

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE UNA PRÓTESIS ROBOTIZADA PARA  
MIEMBRO SUPERIOR ACTIVADA POR ELECTROMIOGRAFÍA**

**LAURA MARCELA PRIETO ZULETA**

**PROYECTO DE GRADO DE TECNOLOGÍA MECATRÓNICA**

**DIRECTOR DEL PROYECTO: GUSTAVO ADOLFO OSPINA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**PEREIRA**

**2017**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
Introducción	7
Objetivos General	8
Objetivos Especifica	8
<b>Capítulo I</b>	
<b>Estudio de la mano y elementos fundamentales para este proyecto</b>	<b>9</b>
1. Estado del arte en Colombia	9
1.1 Conceptos generales	10
1.1.1 Anatomía de la mano, muñeca y antebrazo	10
1.1.1.1 Osteología	10
1.1.1.1.2 Antebrazo	11
1.1.1.1.3 Muñeca	12
1.1.1.1.4 Mano	13
1.1.2 Estudio biomecánico y de movilidad del antebrazo, Muñeca y mano	15
1.1.2.1.1 Antebrazo: Biomecánica	15
1.1.2.1.2 Muñeca: Biomecánica, rango de movilidad articular	15
1.1.2.1.3 Mano: Funciones de la mano y Biomecánica, rango de movilidad articular	16
1.1.3 Análisis de los músculos del brazo	19
1.1.3.1.1 Miología de la brazo	19
1.2 Amputaciones de la extremidad superior	22
1.2.1 Amputación de la muñeca	22
1.2.2 Amputaciones del antebrazo	22
1.2.3 Amputaciones del brazo	22
1.3 Sistemas protésicos	23
1.3.1 Tipos de Prótesis Mecánicas	23
1.3.2 Tipos de Prótesis Eléctricas	23
1.3.3 Tipos de Prótesis neumáticas	24
1.3.4 Prótesis mioeléctricas	24
1.3.5 Tipo de Prótesis Híbridas	24
1.4 Mecanismos y grados de movilidad	24
1.4.1 Criterio de Grübler	25
1.4.2 Criterio de Grübler en el plano	25
1.5 Electromiografía	26
1.5.1 La unidad motora	28

1.5.2 Electroodos	28
1.5.3 Plataforma e-health sensor	29

## Capitulo II

<b>2. Diseño de la prótesis, algoritmos e implementación de datos teóricos</b>	31
2.1 Servomotor elegido	31
2.2 Diseño de la prótesis robótica en el software Solidworks	32
2.3 Piezas en Solidworks	35
2.4 Algoritmos de los programas utilizados para adquirir la señal electromiografía	36
2.5 Control de los servos a partir del voltaje que genera la señal	37
2.6 Cálculos teóricos cinemáticos	38

## Capitulo III

<b>3. Adquisición de la señal</b>	40
4. Presupuesto	43

## Capitulo IV

<b>5. Simulación, resultado, recomendación y conclusión</b>	44
5.1 . Simulación de movimiento en el software de diseño mecánico Solidworks	44
5.2 Resultados	46
5.3 Recomendaciones	49
5.4 Conclusión	49
6. Bibliografía	50
<b>7. Anexos</b>	52
7.1 Diseño de prótesis	53
7.1.1 Planos	107
7.2 Algoritmos	108

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Imagen 1:</b> Huesos que conforman la mano y la muñeca. Cortesía [9]	11
<b>Imagen 2:</b> Huesos del antebrazo derecho, vista anterior de los huesos del antebrazo: el radio y el cúbito. Cortesía [9]	11
<b>Imagen 3:</b> Movimiento y funciones de las monas.	16
<b>Imagen 4:</b> Rangos de movimiento de las falanges.	19
<b>Imagen 5:</b> Músculos del tronco anterior, los hombros y el brazo. (a) Músculos que cruzan la articulación de los hombros, provocando así los movimientos del brazo. Se ha quitado de la imagen el platismo del cuello. Cortesía [9]	21
<b>Imagen 6:</b> Músculos posteriores de cuello, tronco y brazo. Músculos superficiales. Cortesía [9]	21
<b>Imagen 7:</b> Nombre y ubicaciones d amputación en miembro superior.	23
<b>Imagen 8:</b> Criterio de Grüber. Cortesía de [14]	26
<b>Imagen 9:</b> Izquierda: modelo electrico de una celula, Derecha: canales de sodio potasio, obtenida de [15]	27
<b>Imagen 10:</b> Grafica del potencial de accion, obtenida de [15]	27
<b>Imagen 11:</b> Modelo de los iones en el contacto del electrodo con la piel, cortesía [15]	28
<b>Imagen 12:</b> Diseño del canal EMG utilizado por la plataforma E-Health	30
<b>Imagen 13:</b> e-Health Sensor Shield V2	30
<b>Imagen 14:</b> Diseño del servomotor en Solidworks	31
<b>Imagen 15:</b> Proporcionada por el Datasheet del servomotor escogido	32
<b>Imagen 16:</b> Diseño de Prótesis Robótica en Solidworks	33
<b>Imagen 17:</b> Diseño de Prótesis Robótica en Solidworks	33
<b>Imagen 18:</b> Diseño de Prótesis Robótica en Solidworks, vista lateral.	34
<b>Imagen 19:</b> Diseño de Prótesis Robótica en Solidworks, Vista Trasera.	34

<b>Imagen 20:</b> Servomotor MG90S, actuador que dará movimiento a la mano, dedos y muñeca	35
<b>Imagen 21:</b> diseño gráfico de los dedos de la mano robótica	35
<b>Imagen 22:</b> Diagrama de Flujos	36
<b>Imagen 23:</b> Simulación del servo a partir de la señal que se genere en un movimiento	37
<b>Imagen 24:</b> Simulación del servo a partir de la señal que se genere en un movimiento	38
<b>Imagen 25:</b> Conexión de los electrodos a la tarjeta e-Health V2.0 para la adquisición de la señal.	40
<b>Imagen 26:</b> Ubicación de los electrodos en el musculo	41
<b>Imagen 27:</b> Gráfico de la señal al contraer el brazo, electrodos ubicados en el bíceps	41
<b>Imagen 28:</b> Gráfico de la señal al hacer movimientos el brazo, electrodos ubicados en el bíceps	42
<b>Imagen 29:</b> Gráfico de la señal al contraer y soltar el brazo, electrodos ubicados en el bíceps	42
<b>Imagen 30:</b> Gráfico de la señal al soltar el brazo, electrodos ubicados en el bíceps	43
<b>Imagen 31:</b> Simulación de movimientos de los dedos	44
<b>Imagen 32:</b> Flexión de la muñeca de la mano	45
<b>Imagen 33:</b> Giro de la muñeca	46
<b>Imagen 34:</b> Señal del bíceps	48
<b>Imagen 35:</b> Señal del Deltoides	48
<b>Imagen 36:</b> Señal del Tríceps	49
<b>Imagen 37:</b> Dedo Meñique.	53
<b>Imagen 38:</b> Dedo Índice.	60
<b>Imagen 39:</b> Dedo medio	67
<b>Imagen 40:</b> Dedo Anular.	74
<b>Imagen 41:</b> Dedo Pulgar.	81
<b>Imagen 42:</b> Antebrazo.	88

<b>Imagen 43:</b> Palma de la mano.	93
<b>Imagen 44:</b> Servomotor MG90s	100
<b>Imagen 45:</b> Foto de la Mano Robótica.	107
<b>Imagen 46:</b> Foto de Prótesis Robótica	107
<b>Imagen 47:</b> Mano Robótica	108
<b>Imagen 48:</b> Código del programa para adquirir la señal desde Arduino	108
<b>Imagen 49:</b> Código del programa donde se activa el servo dependiendo del valor del voltaje que reciba de la señal	110
<b>Imagen 50:</b> Código que interactúa con el servo modificado	111
<b>Imagen 51:</b> Comunicación del servomotor, Arduino y Matlab.	112

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1:</b> Presupuesto	43
<b>Tabla 2:</b> Amplitud de Señales Electromiografías	47

## INTRODUCCIÓN

El termino discapacidad abarca gran cantidad de situaciones donde personas sufren limitaciones o restricciones en distintas situaciones de la vida cotidiana, entre ellas está la pérdida parcial o total de los miembros superiores con las consecuencias que esto implica. Una solución a este problema es el uso de prótesis con que las personas con dichas discapacidades pueden tener una mejor calidad de vida, sin embargo, por lo general las prótesis más comunes son de índole mecánica sin ninguna automatización.

El presente proyecto de investigación está relacionado con los diferentes aspectos asociados a prótesis de brazo o antebrazo robóticas y el estudio del impacto de las diferentes señales eléctricas originadas en los músculos humanos (electromiografía) que puede ayudar como control a la prótesis robótica. El trabajo de un prototipo a partir de diferentes brazos robóticos disponibles de libre acceso y así generar un modelo propio de fácil construcción y económico, que permita ser controlado por medio de electromiografía.

La organización mundial de la salud OMS en [1] define la discapacidad como un término que abarca las deficiencias, las limitaciones de la actividad y las restricciones de la participación; uno de los tipos de discapacidad que se plantea es la perdida de extremidades ya sea superiores o inferiores por diversas causas como accidentes laborales o de tránsito, enfermedades como la diabetes o genéticas, temas relacionados con el conflicto armado entre otras. Esta discapacidad genera por consiguiente una disminución de la calidad de vida del paciente y como los menciona la OMS en [1], estas personas son particularmente vulnerables a las deficiencias de los servicios de asistencia sanitaria, dependiendo del grupo y las circunstancias, las personas con discapacidad pueden experimentar una mayor vulnerabilidad a afecciones secundarias, comorbilidad, enfermedades relacionadas con la edad y una frecuencia más elevada de comportamientos nocivos para la salud y muerte prematura.

Las personas con discapacidad requieren un amplio espectro de servicios, desde intervenciones relativamente sencillas y baratas hasta otras complejas y costosas, de acuerdo con sus necesidades, las cuales pueden estar relacionadas con actividades cotidianas, como el cuidado personal, el acceso a la asistencia y el equipamiento, la participación en la educación, el empleo, las actividades sociales y las modificaciones en el hogar o el lugar de trabajo.

Así que el desarrollo de sistemas que mejoren la calidad de vida de las personas con discapacidad es vital para un país con más calidad humana, además que

alternativas de bajo costo en sistemas de prótesis mejoraría la atención a personas de bajos recursos que no puede acceder a una prótesis robotizada.

Con la finalidad de adquirir más conocimiento y practica para la construcción del brazo robótico, se desarrollaron diferentes actividades desde la adquisición de la señal, procesamiento y uso de ella para accionar el actuador. El diseño de la prótesis mecánica se hizo de una forma estética y eficiente para los movimientos que se harán posible gracias al servomotor.

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un prototipo de prótesis robotizada accionada mediante electromiografía (EMG), utilizando la plataforma e-Health sensor.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Crear un modelo 3D de al menos 3 grados de libertad en un software de diseño mecánico basado en servomotores.
- Realizar un estudio cinemático de la prótesis para determinar la forma de la señal de control de los actuadores.
- Desarrollar un proceso de adquisición de las señales de electromiografía (EMG) usando la plataforma e-Health sensor.
- Caracterizar las señales de EMG basado en parámetros morfológicos con el fin de crear un software que manipule la prótesis.
- Simular por medio de un software el movimiento de la prótesis usando electromiografía.



# **CAPITULO I**

## **MARCO TEORICO- ESTADO DEL ARTE**

### **Estudio de la mano y elementos fundamentales para este proyecto**

#### **1. Estado del arte en Colombia**

En Colombia existen diferentes instituciones y universidades preocupadas con la innovación e investigación en Robótica con aplicaciones de tecnologías para la rehabilitación de pacientes discapacitados, con el fin de brindarles mejores condiciones y habilitación laboral y de esta manera mejorar sus calidad de vida; a manera de ejemplo se tiene el Centro de Robótica e Informática [2] , es un centro especializado de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, cuyo objetivo es la generación de conocimiento y el desarrollo de aplicaciones tecnológicas interdisciplinarias con el apoyo en los campos de la informática, la automatización, la didáctica y la robótica

De igual manera existe en la Facultad de Ingeniería Electrónica de La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito [3], desde el año 2002 ha venido consolidando un programa de inclusión social al servicio de la rehabilitación médica. Fue así como se desarrolló por esa época la primera prótesis mioeléctricas con el apoyo del Centro Integral de Rehabilitación de Colombia CIREC.

En [4], docentes y estudiantes de la universidad del Llanos en Colombia, presentan una prótesis robótica que usa electromiografía controlada por un sistema Arduino. Usando electrodos superficiales y 4 servomotores pueden darle a la prótesis 8 grados de libertad

Finalmente se resalta que existen en Colombia diferentes grupos de investigación reconocidos por Colciencias, cuyos propósitos son desarrollar la robótica medica; es el caso del grupo de investigación DAVINCI de la Universidad Militar, grupo “B” por Colciencias, que procura de la rehabilitación de pacientes con diferentes discapacidades y cuyo objetivo es” la generación de investigación aplicada en el campo de robótica de manipuladores. Generación de investigación aplicada en el campo de la robótica móvil de tipo terrestre, aérea y acuática. Desarrollo de nuevas aplicaciones de inteligencia artificial en la robótica de manipuladores y en la robótica móvil. Desarrollo de sistemas mecatrónicas aplicados a las necesidades del área de ingeniería de rehabilitación. Integración de los conceptos teóricos de la robótica a aplicaciones en diferentes campos prioritarios de la vida nacional como el desarrollo de prótesis de mano, dispositivos de rehabilitación motora y dispositivos de apoyo para asistencia en movimiento” entre otros.

Otra experiencia de las muchas existentes en Colombia en materia de robótica medica se ubica en el área de Rehabilitación de la Clínica Universidad de La Sabana

[5], la que estrenó nueva tecnología para la atención de sus pacientes, porque desde finales de 2014, viene trabajando con un Lokomat, equipo robótico destinado a la recuperación del movimiento de las piernas para personas que sufren de lesión medular o de otras patologías que alteran el funcionamiento normal de la marcha. Este equipo robótico es usado para lograr un eficaz mejoramiento de los pacientes en los más reconocidos centros de rehabilitación de Estados Unidos: Rehabilitación Institute of Chicago, Kessler Institute for Rehabilitation, TIRR Memorial Hermann, Mayo Clinic, University of Washington Medical Center y en otros destacados centros de rehabilitación del mundo.

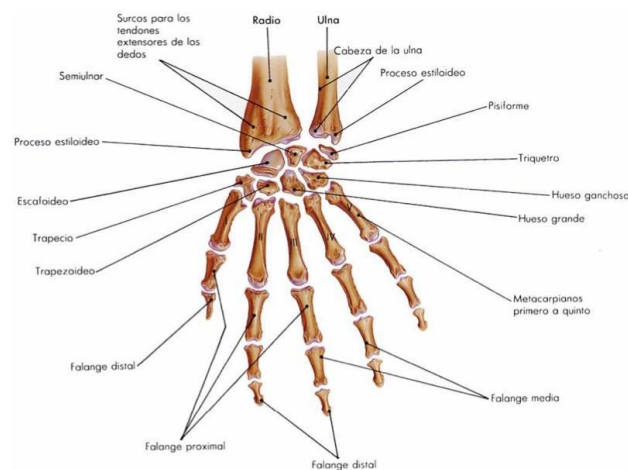
El Lokomat simula y reproduce la marcha fisiológica del individuo acoplándose a las extremidades inferiores del paciente y manteniendo el tronco suspendido de manera controlada. Además, ayuda a la neurorehabilitación, ya que permite aumentar la recordación de actividades cotidianas y monitorizar los parámetros del ejercicio y de la marcha del paciente.

## 1.1 CONCEPTOS GENERALES

### 1.1.1 Anatomía de la mano, muñeca y antebrazo

#### 1.1.1.1 Osteología

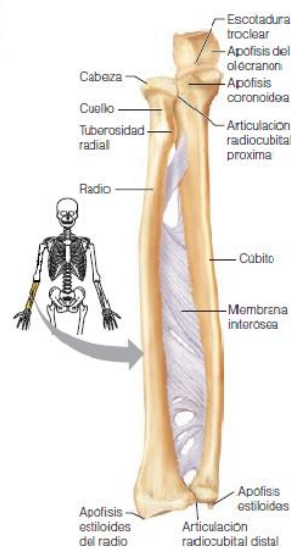
La mano humana y el antebrazo se componen de 27 huesos: 14 huesos son falanges en los dedos, 5 metacarpianos en el área de la palma, y 8 carpos en la muñeca [9], como se ve en la Imagen 1.



*Imagen 1: Huesos que conforman la mano y la muñeca.*

*Cortesía [9]*

El esqueleto del antebrazo está formado por dos huesos: el radio y el cúbito (véase imagen 2). Cuando el cuerpo se encuentra en la posición anatómica, el radio es el hueso lateral; es decir, se encuentra en la cara del antebrazo en la que se encuentra el pulgar. Al girar la mano de modo que la palma apunte hacia atrás, el extremo distal del radio cruza hasta la parte medial del cúbito. En las partes proximal y distal, el radio y el cúbito se articulan en pequeñas articulaciones radio cubital, y los dos huesos se conectan en toda su extensión mediante la flexible membrana interósea. Tanto el cúbito como el radio poseen una apófisis estilóide en su extremo distal. La cabeza con forma de disco del radio también forma una articulación con el cóndilo del húmero. Justo debajo de la cabeza se encuentra la tuberosidad radial, donde se une el tendón del bíceps.



*Imagen 2: Huesos del antebrazo derecho, vista anterior de los huesos del antebrazo: el radio y el cúbito.*

*Cortesía [9]*

### **1.1.1.2 Antebrazo**

Según [6] el antebrazo está conformado por dos huesos: el cúbito y el radio que están paralelos entre sí, siendo el cúbito más largo que el radio. Ambos huesos están unidos en sus extremos por articulaciones móviles, y en su parte media forman un espacio llamado espacio interóseo, ocupado por la membrana interósea.

Como se ve en [6] se distinguen tres regiones:

1. Anterior, conformada por ocho músculos, dispuestos en cuatro planos:
  - Pronador redondo, palmar mayor, palmar menor y cubital anterior.
  - Flexor común superficial de los dedos.
  - Flexor propio del pulgar y flexor profundo común de los dedos.
  - Pronador cuadrado.
2. Región externa, comprende cuatro músculos y son:

- Supinador largo,
  - Primer radial externo,
  - Segundo radial externo
  - Supinador corto.
3. Región posterior, comprende ocho músculos dispuestos en dos capas:
- Capa superficial: extensor común de los dedos, extensor propio del dedo meñique, cubital posterior y el ancóneo.
  - Capa profunda: abductor largo del pulgar, extensor corto del pulgar, extensor largo del pulgar y extensor propio del índice.

### 1.1.1.3 Muñeca

La muñeca comprende el extremo distal del radio, la articulación radio- escafoidea-semilunar, los ocho huesos del carpo (escafoides, semilunar, piramidal y pisciforme en la fila proximal; trapecio, trapezoide, hueso grande y ganchoso en la fila distal, y el ligamento triangular que se encuentra entre la apófisis estiloides cubital y el borde cubital del radio, [6].

Se distinguen tres caras:

**1. Cara posterior:** se encuentran los tendones extensores de la mano, atravesando las 6 correderas tendinosas de la cara posterior de la muñeca.

- Primera corredera: abductor largo y extensor corto.
- Segunda corredera: los dos radiales.
- Tercera corredera: extensor largo del pulgar.
- Cuarta corredera: extensor común y del índice.
- Quinta corredera: extensor del quinto dedo.
- Sexta corredera: cubital posterior.

**2. Cara externa:** constituida por la tabaquera anatómica limitada hacia el dorso por el tendón del extensor largo del pulgar; y hacia la palma, por los tendones del extensor corto y el abductor largo del pulgar. Hacia arriba y abajo, el límite lo da la convergencia de los tres tendones.

**3. Cara anterior:** se encuentran los tendones de ambos palmares (el mayor que es externo y el menor que es interno), por debajo el ligamento anterior o anular del carpo, que conjuntamente con la cara anterior de los huesos del carpo va a formar el llamado “túnel del carpo”, por donde pasan los nueve tendones flexores de los dedos (4 del flexor profundo, 4 del flexor superficial y el flexor propio del pulgar), y el nervio mediano.

#### 1.1.1.4 Mano

La mano, el extremo distal de la extremidad superior, tiene como función esencial la prensión. Está conformada por un conjunto de huesos que son los siguientes: fila distal del carpo, metacarpianos y falanges; de los cuatro huesos del carpo, salen hacia abajo a manera de radios divergentes 5 metacarpianos, y de cada una de estas cinco columnas se añaden los cinco dedos, cada uno formado por tres falanges a excepción del dedo externo que tiene solamente dos [6].

Estas piezas óseas se mantienen relacionadas mediante las articulaciones carpometacarpianas, intermetacarpianas basales, metacarpofalángicas e interfalángicas. Recubriendo a estos elementos óseos, vamos a describir tres zonas (palmar, dorsal y dedos).

**1. Región palmar:** 6 planos, yendo de la profundidad hacia la superficie:

- **Osteomuscular profundo:** aparte de los metacarpianos, tenemos los tres interóseos palmares, el aductor del pulgar y el oponente del meñique; por la base del primer espacio interóseo llega la arteria radial.
- **Vasculonervioso profundo retrotendinoso:** la arteria radial forma el arco palmar profundo; el nervio cubital da su rama profunda, distribuyendo ramas musculares desde la convexidad.
- **Plano tendinoso-vaginal:** flexor corto y oponente del pulgar, flexor del meñique; el flexor largo del pulgar forma una escotadura sobre estos músculos tenares. Los lumbricales nacen de los lados de los dos tendones flexores profundos vecinos. Aquí tenemos las vainas sinoviales tendinosas del pulgar y del quinto dedo y son las sinoviales dígito-carpianas; los tendones del 2º, 3º y 4º dedos (flexores), no tienen vaina sinovial a este nivel.
- **Plano vásculo-nervioso superficial:** el arco palmar superficial continúa el tronco de la arteria cubital; aquí están los músculos abductores del pulgar y aductor del meñique.
- Plano aponeurótico y del músculo palmar cutáneo en la base de la zona hipotenar.
- **Pliegues cutáneos palmares:** el curvo limitante de la eminencia tenar y el oblicuo que nace entre el índice y el medio y va hacia el borde interno de la palma. El transversal horizontal corresponde a la línea de canavel y es la zona de flexión de las metacarpofalángicas.

**2. Región dorsal:** en su parte distal están los nudillos, conformados por el dorso de la cabeza de los cuatro últimos metacarpianos. Siguiendo los ejes metacarpianos se encuentran los tendones extensores de los dedos, que atraviesan su propia vaina sinovial a nivel del dorso del carpo. La articulación carpometacarpiana del pulgar pertenece al género de las articulaciones por encaje recíproco; las carpometacarpianas de los cuatro últimos dedos, se les coloca en el grupo de las artrodías. Las metacarpofalángicas pertenecen al género de las condíleas y las interfalángicas pertenecen al género de las trocleartrosis.

**3. Dedos:** en la cara anterior tenemos la inserción distal del flexor común superficial que, desdoblándose en dos lengüetas, se inserta en las caras laterales de la falange media y es flexor de ésta. El flexor común profundo, pasa a través del ojal del superficial y se inserta en la base de la falange distal siendo flexor de la misma. Ambos tienen su polea de reflexión en la cara anterior de la falange media y proximal; el flexor largo del pulgar se inserta distalmente en la cara palmar de la base de la falange distal del pulgar. En la cara posterior hay una formación aponeurótica triangular de vértice distal montada sobre el dorso de la falange proximal y conformada por los tendones del extensor y por los interóseos lumbricales, y se inserta distalmente a través de una bandeleta media en la base de la falange media y por medio de dos bandeletas laterales que se unen en la base de la falange distal. Tanto el extensor propio del segundo dedo como el del quinto, se insertan distalmente sobre el extensor común que va al segundo y quinto respectivamente. El extensor largo del pulgar se inserta en la base de la falange distal, mientras que el corto lo hace en la base de la falange proximal. Los lumbricales en acción con los interóseos, extienden las articulaciones interfalángicas, a la vez que flexionan las metacarpofalángicas.

### 1.1.2 ESTUDIO BIOMECÁNICO Y DE MOVILIDAD DEL ANTEBRAZO, MUÑECA Y MANO [6]

La biomecánica es el estudio de los movimientos biológicos explicado a través de las leyes físicas de la mecánica clásica tales como cinemática, fuerzas, momento lineales y angulares, equilibrio, ect. La biomecánica aporta un enfoque útil en el estudio y solución de los problemas que afectan al hombre.

#### 1.1.2.1.1 ANTEBRAZO

##### **Biomecánica**

Existen 3 movimientos:

**Pronosupinación:** Movimiento de rotación del antebrazo en torno a su eje longitudinal, para lo cual es necesaria la intervención de dos articulaciones: la radio cubital superior y la radio cubital inferior, ver [6].

**Supinación:** Movimiento de rotación lateral sobre el eje del hueso del antebrazo, por virtud del cual se vuelve hacia adelante la palma de la mano.

**Pronación:** Movimiento de rotación medial sobre el eje del hueso del antebrazo, de manera que la palma de la mano es volteada de una posición anterior a una posición posterior.

#### 1.1.2.1.2 MUÑECA

##### **Biomecánica, rango de movilidad articular**

La muñeca es una articulación que puede tener los siguientes movimientos, [6]:

- Flexión: la flexión dorsal o dorsiflexión de la muñeca tiene los siguientes ángulos de 0° a 60°, la flexión palmar es de 0° a 80°.
- Extensión: de 65° a 85°
- Abducción o alejamiento: de 0° a 30°
- Adducción o acercamiento: de 0° a 60°
- Circunducción: combina la flexión dorsal y la palmar.

La posición de referencia para la medición de la amplitud de los movimientos, se da cuando el eje de la mano, materializado por el tercer metacarpiano y el tercer dedo, está situado en la prolongación del eje del antebrazo. Un tercer eje, el longitudinal o axial, permite movimientos pasivos, nunca activos, de pronosupinación a nivel metacarpiano y/o medio carpiano. El movimiento de circunducción, es la combinación de los movimientos de flexoextensión y lateralización, describiendo un

cono de revolución irregular de base elipsoidal asimétrica. La posición funcional de la muñeca es de ligera flexión dorsal.

### 1.1.2.1.3 MANO

#### Funciones de la mano

La mano realiza principalmente dos funciones; la prensión y el tacto según [7], a partir de movimientos la mano permite desarrollar acciones que habitualmente son necesarios y que en combinación con las funciones que tiene principalmente permite un avance en todo lo que realiza a diario. Cuando la mano es supervisada por la vista, ésta es llamada mano de trabajo. Si la mano no es supervisada por la vista, sino al control táctil, entonces es llamada mano auxiliar. La mano protésica inicia como mano auxiliar, pero al faltarle el sentido del tacto es controlada por la vista, convirtiéndose en ese momento en mano de trabajo, con lo que la mano sana adquiere la función de la mano auxiliar.

Conocer los principales tipos de prensión de la mano es de suma importancia, ya que la prótesis deberá ser diseñada para cumplirlos. A continuación, se muestran cuatro formas básicas de prensión de la mano, que combinadas cumplen con todos los movimientos realizados por la mano.

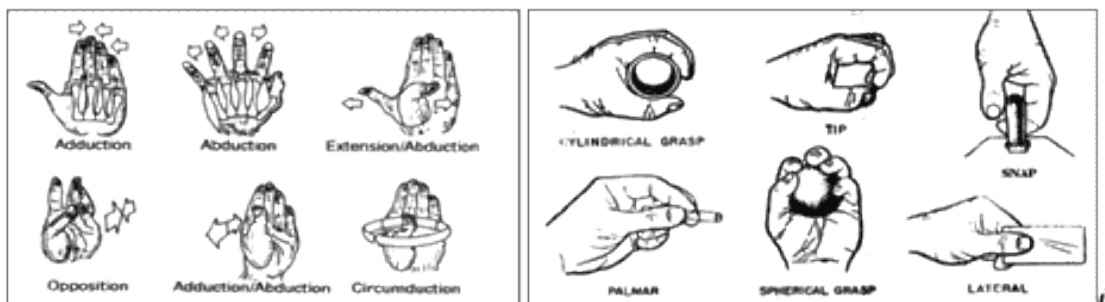


Imagen 3: Movimiento y funciones de las manos.

<https://goo.gl/S2XtsX>



## **Biomecánica, rango de movilidad articular**

### **Biomecánica de la mano**

La mano humana desde un punto de vista biomecánico se puede considerar como un sistema compuesto de segmentos óseos equilibrados por fuerzas tendinosas y musculares y con restricciones articulares. La mano puede adecuarse a la forma de los objetos que sujeta, gracias a su movilidad, la cual es debida a la disposición y dimensiones de las estructuras óseas de que está conformada.

El término cadena cinemática se puede aplicar al conjunto de huesos y articulaciones que conforman cada uno de los dedos. El dedo índice y el dedo pulgar forman una cadena cinemática cerrada cuando juntan sus yemas en un pellizco, con los huesos metacarpianos y del carpo cerrando la cadena [8]. Estas cadenas se pueden estudiar de forma cinemática o dinámica, sin embargo, debido a que los movimientos de las manos y los dedos son lentos, los efectos inerciales son normalmente despreciables, lo que permite que se analicen de manera estática.

Dentro de la gama de movimientos, las articulaciones interfalángicas (IF) se pueden considerar como articulaciones tipo bisagra que brindan movimientos de flexión y extensión. En la mano cada articulación interfalángica tiene por lo menos  $90^\circ$  de movimiento. Las articulaciones metacarpofalángicas (MCF) se consideran articulaciones universales, ya que no sólo ejecuta movimiento de flexo-extensión con un rango de  $90^\circ$ , sino que también de abducción aducción, con un rango de movimiento de  $20^\circ$  a  $30^\circ$  cuando los dedos están extendidos

Para asir un objeto, la mano se ahueca y forma una bóveda, un canal de concavidad anterior, cuyas orillas están limitadas por tres puntos: el pulgar que forma la orilla externa y el índice y meñique que limitan la orilla interna. Cuando se separan los dedos, el eje de cada uno de ellos convergen a nivel del tubérculo del escafoides. En la mano, los movimientos de los dedos se realizan en relación al eje de la mano (tercer metacarpiano y dedo medio), y no al plano de simetría del cuerpo. Cuando cerramos el puño con las interfalángicas distales extendidas, los ejes de las últimas falanges de los cuatro dedos últimos y el eje del pulgar, excepto su última falange, convergen en un punto en la parte distal del canal del pulso.

El pulgar tiene abducción (se pone a  $90^\circ$  con la palma dependiendo del nervio radial), oposición (signo de la O, depende del nervio mediano), y adducción (el pulgar se acerca al eje medio de la mano, depende del nervio cubital). Estos movimientos se realizan en la articulación trapecio-metacarpiana, que es del tipo de encaje recíproco. Además, el pulgar tiene flexoextensión en sus articulaciones metacarpofalángicas (flexiona el flexor corto del pulgar, nervios mediano y cubital, extiende el extensor corto del pulgar, nervio radial), e interfalángicas (flexiona el flexor largo del pulgar: nervio mediano, extiende el extensor largo del pulgar: nervio radial); en la metacarpofalángica, además, posee movimientos de lateralidad y de rotación axial.

En los últimos cuatro dedos, las metacarpofalángicas tienen flexoextensión e inclinación lateral, y las interfalángicas sólo flexoextensión. La extensión en la metacarpofalángica la realiza el extensor, los interóseos- lumbricales extienden las interfalángicas; si la metacarpofalángica está en flexión por acción de los interóseos- lumbricales, es el tendón extensor el que extiende las interfalángicas.

Normalmente el grado de flexo extensión es de 0 a 90° en la metacarpofalángica e interfalángica proximal, y de 0 a 70° en la interfalángica distal; la extensión activa en la metacarpofalángica puede alcanzar los 30° y la pasiva llega casi a los 90°; la extensión en las interfalángicas proximales es nula o muy escasa (5°), en las distales. Los movimientos de lateralidad de las cuatro últimas metacarpofalángicas se realiza en la extensión, siendo nula en la flexión. La separación de los tres últimos dedos, indica indemnidad del nervio cubital (inerva interóseos y los lumbricales internos).

Se llaman músculos intrínsecos de la mano a los músculos cortos que nacen en ella (tenares, hipotenares, interóseos y lumbricales), y extrínsecos de la mano a los que llegan de arriba flexores y extensores largos). Conviene distinguir dentro de la prensión, el gancho (cargar un balde), el empuñado (coger un tubo).

## **Movilidad**

Se debe examinar primero, la movilidad activa de todas las articulaciones; fijando con una mano la zona metacarpiana a nivel de la línea de canavel; indicaremos al paciente que movilice las metacarpofalángicas de los cuatro últimos dedos; fijaremos en extensión las metacarpofalángicas para examinar las interfalángicas proximales, y fijaremos estas últimas en extensión para examinar las interfalángicas distales; igual se procede con el pulgar.

- La fase metacarpofalángica, que supone un 77% del rango de movimiento.
- La fase interfalángica, que supone un 23% del rango de movimiento (véase

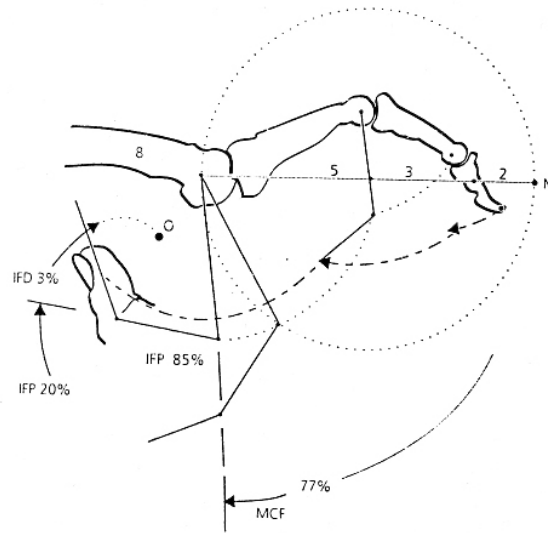


Imagen 4: Rangos de movimiento de las falanges.

Cortesía de <https://goo.gl/VtxBQq>

### 1.1.3 ANÁLISIS DE LOS MÚSCULOS DEL BRAZO

Se realiza una investigación acerca de los músculos que se encuentran en el brazo y la espalda donde podremos partir de esto identificar el mejor lugar para la ubicación de los electrodos, así logrando mejor la señal adquirida al principio del proceso.

#### 1.1.3.1.1 Miología de la brazo [9]

##### Los músculos de las extremidades superiores

Los músculos de las extremidades superiores se dividen en tres grupos. En el primer grupo se incluyen los músculos que surgen de la cintura escapular y cruzan la articulación de los hombros hasta insertarse en el húmero (véanse las Imágenes 4 y 5). Ya hemos hablado de estos músculos que mueven el brazo: el pectoral mayor, el dorsal ancho y el deltoides. El segundo grupo provoca un movimiento en la articulación del codo. Estos músculos encierran el húmero y se insertan en los huesos del antebrazo. En esta sección trataremos solamente los músculos de este grupo. En el tercer grupo se incluyen los músculos del antebrazo, que se insertan en los huesos de la mano y provocan su movimiento. Los músculos de este grupo son finos y con forma de huso, y son muchos. No les trataremos aquí excepto para mencionar su nomenclatura general y sus funciones. Como regla general, los

músculos del antebrazo tienen nombres que reflejan sus 210 Anatomía y Fisiología Humana. Por ejemplo, el flexor de los carpos y los músculos flexores de los dedos, localizados en la sección anterior del antebrazo, provocan la flexión de la muñeca y los dedos, respectivamente. El extensor de los carpos y los músculos extensores de los dedos, localizados en la sección lateral y posterior del antebrazo, extienden las mismas estructuras.

### **Músculos del húmero que actúan en el antebrazo.**

Todos los músculos anteriores del brazo provocan la flexión del codo. En orden decreciente de fuerza encontramos: el braquial, el bíceps del brazo y el braquiorradial (Imagen 3).

#### **Bíceps del brazo**

El bíceps del brazo es el músculo más familiar del brazo porque sobresale al flexionar el codo (véase la Imagen 3). En su origen tiene dos cabezas que parten de la cintura escapular y se insertan en la tuberosidad radial. Este músculo es el poderoso músculo principal de la flexión del antebrazo y produce la supinación de éste. La mejor forma de recordar su función es pensar en abrir una botella de vino. El bíceps supina el antebrazo para hacer girar el sacacorchos y después flexiona el codo para sacar el corcho.

#### **Braquial**

El braquial se encuentra por debajo del bíceps y resulta tan importante para la flexión del codo como él. El braquial levanta el cúbito, así como el bíceps hace lo propio con el radio.

#### **Braquiorradial**

El braquiorradial es un músculo bastante débil que surge en el húmero y se inserta en el antebrazo distal. Por tanto, reside principalmente en el antebrazo.

#### **Tríceps del brazo**

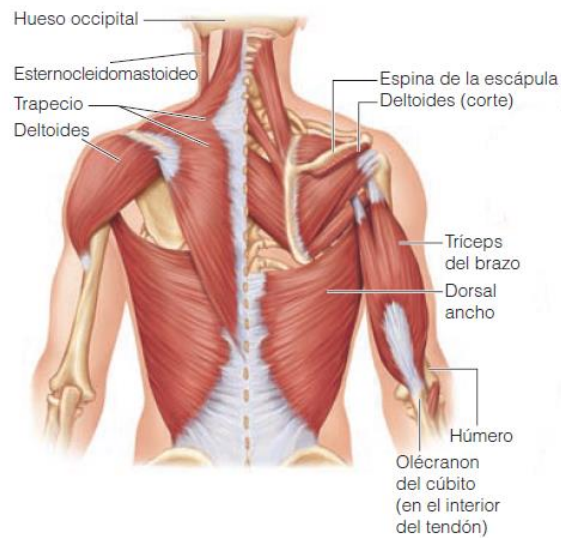
El tríceps del brazo es el único músculo que surge de la parte posterior del húmero (véase la Imagen 3). Sus tres cabezas parten de la cintura escapular y el húmero proximal, y se insertan en el olecranon del cúbito. Se trata del poderoso músculo principal de la extensión del codo y del antagonista del bíceps. Este músculo a

menudo se conoce como el “músculo del boxeador” porque puede producir un puñetazo de KO con el brazo estirado.



*Imagen 5: Músculos del tronco anterior, los hombros y el brazo. (a) Músculos que cruzan la articulación de los hombros, provocando así los movimientos del brazo. Se ha quitado de la imagen el *platismo del cuello*.*

*Cortesía [9]*



*Imagen 6: Músculos posteriores de cuello, tronco y brazo. Músculos superficiales*

*Cortesía [9]*

## **1.2 AMPUTACIONES DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR [10]**

El sector que le llegara a dar uno a estas prótesis tiene determinadas clasificaciones debido a un factor importante que es la clase de amputación que puede presentar el paciente, y teniendo cada característica se podrá dar una eficiente solución a su discapacidad. A continuación, se hablará de alguna de ellas:

### **1.2.1 Amputación de la muñeca**

Amputación transcarpiana desarticulación de la mano estos dos tipos de amputación son preferibles a la amputación a través del antebrazo, porque, debido a que no se modifica la articulación radio cubital, se conserva la pronación y la supinación; estos movimientos son valiosos para el paciente y debe hacerse todo lo posible por conservarlos.

### **1.2.2 Amputaciones del antebrazo**

(Por debajo del codo)

En las amputaciones a este nivel es deseable conservar la mayor longitud de extremidad posible. Cuando la articulación de la extremidad superior está muy afectada, es menos probable que curen bien las amputaciones a través del tercio distal, que las realizadas a un nivel más proximal, debido a que la piel más distal suele ser más delgada y tiene menos tejido subcutáneo; también los tejidos blandos a nivel más distal se componen básicamente de estructuras poco vascularizadas como fascia y tendones. Por esta razón en estas circunstancias excepcionales es preferible la amputación en la unión de los tercios medio y distal del antebrazo.

### **1.2.3 Amputaciones del brazo**

(Por encima del codo)

Este tipo de amputación se define como aquella realizada a cualquier nivel deseado entre la región supracondílea del húmero y el nivel del pliegue axilar. Como en todas las demás amputaciones debe conservarse la mayor longitud del miembro.

Se presenta una clasificación más a detalle los nombres conocidos en el campo de la medicina de los niveles de amputación para miembro superior:

- Amputación interescapulo-torácica o de clavícula
- Desarticulación del hombro
- Amputación transhumeral o por encima del codo
- Desarticulación del codo
- Amputación transradial o por debajo del codo
- Desarticulación de la mano y la muñeca

- Amputación transcarpal o de mano parcial
- Amputación de dedos

Se reaccionan estos tipos de nombre a la siguiente imagen para mejor visualización en relación con lo anterior

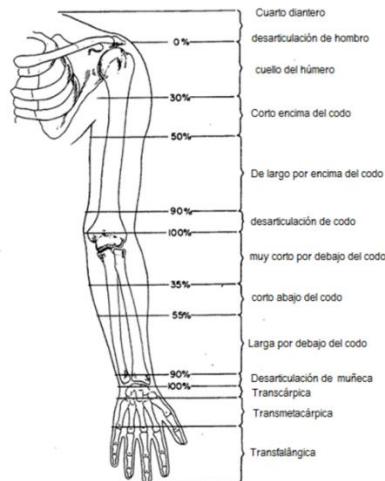


Imagen 7: Nombre y ubicaciones d amputación en miembro superior.

Cortesía de <https://goo.gl/ftQhrk>

### 1.3 SISTEMAS PROTÉSICOS [11]

Como se ve en [11], las prótesis requieren de los siguientes elementos:

- Fuente de energía
- Sistema de transmisión de fuerza.
- Un sistema de mando o control
- Un dispositivo que haga presión.

Entre los tipos de prótesis más comunes tenemos:

#### 1.3.1 Prótesis Mecánicas

Las manos mecánicas utilizan la función de apertura o cierre por medio de un arnés el cual se sujeta alrededor de los hombros, parte del pecho y parte del brazo controlado por el usuario.

#### 1.3.2 Prótesis Eléctricas

Estas prótesis usan motores eléctricos con una batería recargable. Estas prótesis se pueden controlar de varias formas como botón pulsador o botón con interruptor de arnés.

### **1.3.3 Prótesis neumáticas**

Estas prótesis utilizan fuerza neumática para funcionar, como ácido carbónico comprimido

### **1.3.4 Prótesis mioeléctricas**

Las prótesis mioeléctricas son prótesis eléctricas controladas por medio de una señal de electromiografía, según [11] estas prótesis son hoy en día el tipo de miembro artificial con más alto grado de rehabilitación.

### **1.3.5 Tipo de Prótesis Híbridas**

Una prótesis híbrida combina la acción del cuerpo con el accionamiento por electricidad en una sola prótesis.

## **1.4 MECANISMOS Y GRADOS DE MOVILIDAD**

La mano humana tiene un alto número de grados de libertad, alta relación de fuerza/peso, bajo factor de forma y un sistema sensorial complejo. Cada dedo cuenta con tres falanges, falange distal, media y proximal, mientras que el dedo pulgar solo cuenta con la falange distal y proximal.

La cantidad GDL (Grados de Libertad) permiten múltiples configuraciones de aprehensión y manipulación que van incrementando en potencialidad al cambiar los planos de trabajo, ya que poseen articulaciones tipo bisagra que permiten dicha característica [12]

Una maquina es una combinación de cuerpos dispuestos de tal forma que producen un trabajo. Actualmente el concepto de maquina connota la capacidad para transmitir niveles de fuerza/momentos considerables como ocurre, por ejemplo, con el motor de un automóvil. Cuando la fuerza/momento involucrados son pequeños, la principal función del dispositivo es transmitir o modificar el movimiento; entonces, en lugar de hablar de máquinas se suele hablar de mecanismos, como por ejemplo en un reloj. En cualquier caso, la frontera entre máquinas y mecanismos es difusa, por lo que los utilizaremos como términos intercambiables. Los mecanismos están compuestos por elementos. Todos los elementos de un mecanismo tienen posibilidad de movimiento excepto uno, denominado elemento fijo. Los elementos están compuestos por partículas materiales, que se desplazan relativamente unas con respecto de otras cuando el elemento se encuentra bajo la acción de fuerzas exteriores.



## DEFINICIONES DE GRADOS DE LIBERTAD

Se presentan a continuación algunas definiciones de los grados de libertad en textos de estadística de uso común: “La suma de los valores de las desviaciones de los valores individuales con respecto a su media es igual a cero, hecho que puede demostrarse. Si se conocen los  $n-1$  valores de los valores a partir de la media, entonces se conoce el  $n$ -ésimo valor, ya que queda determinado automáticamente debido a la restricción de 3 que todos los valores de  $n$  sumen cero”. [13]

Para definir los grados de libertad a debemos hacer uso de criterio de Grübler, a continuación hablaremos más de este importa te aspecto es este proyecto

### 1.4.1 Criterio de Grübler

El criterio de Grübler sirve para determinar el número de grados de libertad de un mecanismo a partir del número de elementos y pares que lo componen [14]. A continuación, veremos por separado el criterio de Grübler para mecanismos planos y tridimensionales.

### 1.4.2 Criterio de Grübler en el plano

Un conjunto de  $N$  elementos libres (sin pares) tiene  $3N$  grados de libertad en el plano, pues cada elemento libre tiene 3 grados de libertad. Al fijar un elemento quedan  $3(N - 1)$  grados de libertad, correspondientes a los  $N - 1$  elementos móviles que quedan. Para formar un mecanismo, unimos a continuación los elementos mediante pares cinemáticos. Cada nuevo par cinemático restringe posibilidades de movimiento de los elementos: por ejemplo, un par de clase I restringe dos grados de libertad, pues permite un único movimiento. Análogamente, un par de clase II restringe un grado de libertad, pues permite dos movimientos. Por tanto, el número de grados de libertad  $G$  se obtiene restando los grados de libertad restringidos por los pares a los  $3(N - 1)$  grados de libertad que tenían los elementos flotantes, como se ve en la ecuación 1

$$G = 3(N - 1) - 2p_l - p_{ll} \quad (1)$$

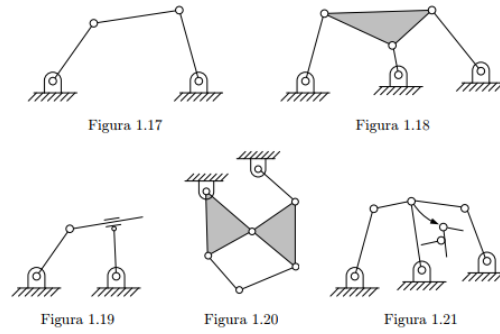


Imagen 8: Criterio de Grübler. Cortesía de [14]

Donde  $p_I$  y  $p_{II}$  son los números de pares de clase I y II, respectivamente. Veamos, a continuación, algunos ejemplos que muestran el uso y las limitaciones del criterio de Grübler.

## 1.5 ELECTROMIOGRAFÍA

Es el estudio de la actividad eléctrica de los músculos del esqueleto, según en un sentido eléctrico, ver [15], las cosas vivas pueden modelarse como una bolsa de agua que tiene varias sales disueltas, las cuales se ionizan en la solución y crean un electrolito con una carga iónica positiva y otra negativa, como se ve en la imagen 4. Las cargas positivas están asociadas primordialmente a sodio y el potasio mientras que las negativas al cloro y el grupo hidroxilo y aunque a gran escala estas cargas están equilibradas las células pueden generar un transferencia de cargas asociados a los canales de sodio y potasio en la membrana celular, esto en esencia es el origen de esta actividad eléctrica y hacen que la célula experimente contracciones y relajaciones dado por la de polarización y re polarización generadas por el cambio en la polaridad eléctrica en la célula.

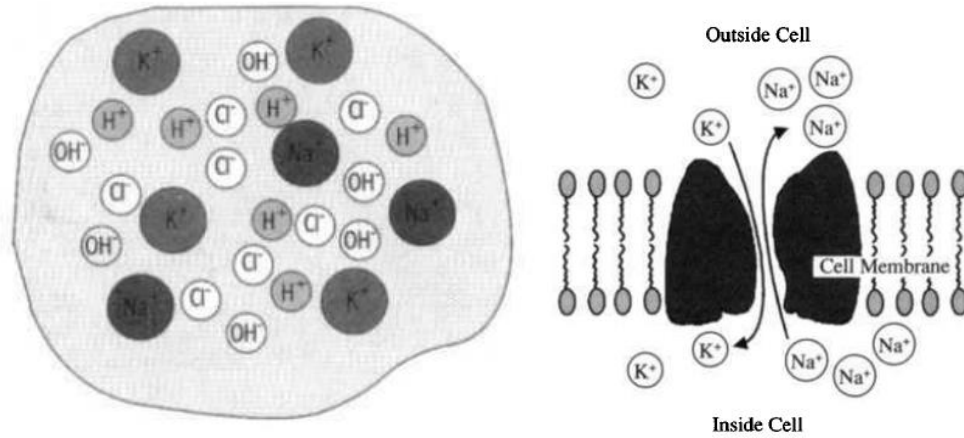


Imagen 9: Izquierda: modelo electrico de una celula, Derecha: canales de sodio potasio, obtenida de [15]

El potencial de acción en reposo de la célula es de 70 a 90 mv y la velocidad de propagación de este potencial depende del diámetro y el tipo de la fibra. Según Rosenfalck en [16] el potencial de acción puede ser analíticamente representado así:

$$V_m(z) = \begin{cases} Az^3 e^{-\lambda z} + B & z > 0 \\ 0 & z \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Con  $\lambda = 1\text{mm}^{-1}$ ,  $A = 96\text{mv} \cdot \text{mm}^{-3}$ ,  $B = -90\text{mv}$

La forma del potencial de acción se puede apreciar en la imagen 5:

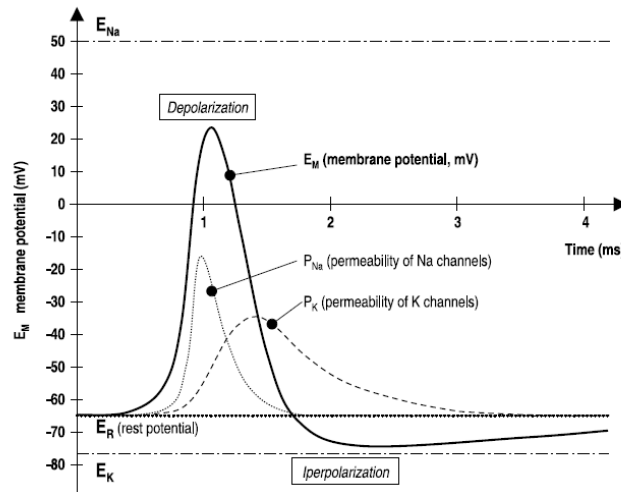


Imagen 10: grafica del potencial de accion, obtenida de [15]

### 1.5.1 La unidad motora

Los músculos esqueléticos están compuestos por células casi paralelas llamadas fibras musculares. En los seres humanos, las fibras musculares tienen una longitud variable de unos pocos milímetros a varios centímetros y un diámetro en el rango de aproximadamente diez a cien micrómetros, ver [16], cada fibra puede si está excitada puede acortar su longitud de reposo.

Las fibras musculares son activadas por el sistema nervioso central a través de señales eléctricas transmitidas por moto neuronas. Una moto neurona inerva un grupo de fibras musculares que constituyen así la unidad funcional más pequeña del músculo. La moto neurona y las fibras que inerva se denominan unidad motora.

### 1.5.2 Electrodo

Los electrodos convierten una señal electroquímica iónica en una corriente de electrodos en un alambre. La señal mioelectricas tienen una amplitud que varía entre algunas microvoltios a milivoltios por lo que no es difícil lograr su amplificación, sin embargo, este proceso se ve afectado debido a los electrodos y su interacción con la piel así u otro tipo de movimientos corporales como la respiración generan artefactos en la señal, como el movimiento de la línea base (baseline drift), ver [15].

Funcionan al disolverse algunos de los átomos del electrodo en la solución salina (piel o piel con una solución salina), estos átomos disueltos pierden un electrón y quedan con carga positiva mientras que los átomos en el superficie del metal quedan con carga negativa, esto crea un campo eléctrico que atrae los iones a la superficie del metal creando una capa llamada capa de Helmholtz y a su vez genera una diferencia de potencial que puede que es igual a la señal bioeléctrica, como se ve en la imagen 6

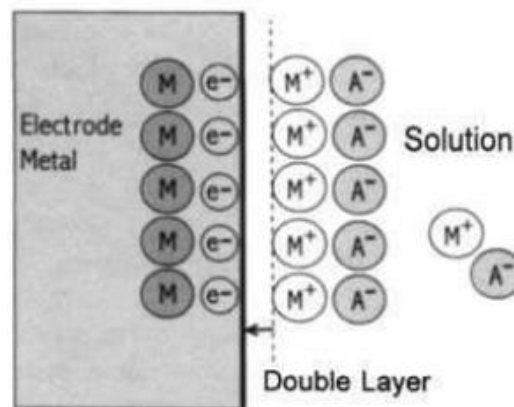
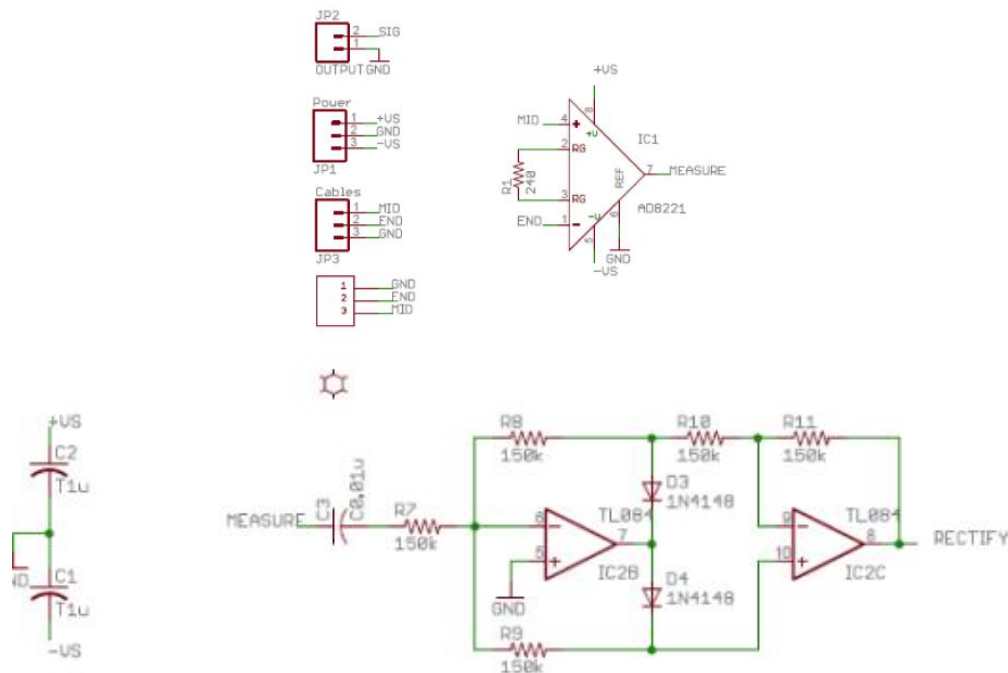


Imagen 11: Modelo de los iones en el contacto del electrodo con la piel, cortesía [15]

Generalmente se utilizan electrodos superficiales adheridos a la piel del paciente y están hechos de materiales como plata, oro, acero inoxidable, entre otros como se aprecia en [15], también se utiliza un gel conductivo o electrolítico el cual mejora la adquisición de la señal.

## Plataforma e-health sensor

E-Health sensor es un shield para Arduino y Raspberry Pi desarrollada por Cooking Hacks [17] que permite el uso de 10 diferentes sensores biométricos como: pulso, saturación de oxígeno en la sangre, respiración, temperatura, electrocardiograma ECG, glucosa en la sangre, respuesta galvánica de la piel, presión sanguínea y electromiografía EMG. Esta información puede ser usada para monitorear en tiempo real el estado del paciente y consecuentemente analizada, sin embargo, dicha plataforma no cuenta con ningún certificado médico por lo tanto no puede usarse para un diagnostico medico en pacientes críticos pues no tiene la precisión requerida para el caso. Es hardware libre y está diseñada para propósitos de investigación y desarrollo. En la imagen 7 se puede observar el canal de electromiografía utilizado por dicha plataforma



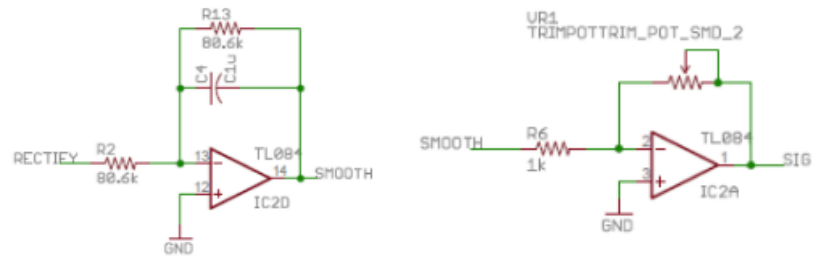


Imagen 12: Diseño del canal EMG utilizado por la plataforma E-Health, [https://www.cooking-hacks.com/media/cooking/images/documentation/e\\_health\\_v2/e-Health\\_v2.0.pdf](https://www.cooking-hacks.com/media/cooking/images/documentation/e_health_v2/e-Health_v2.0.pdf)

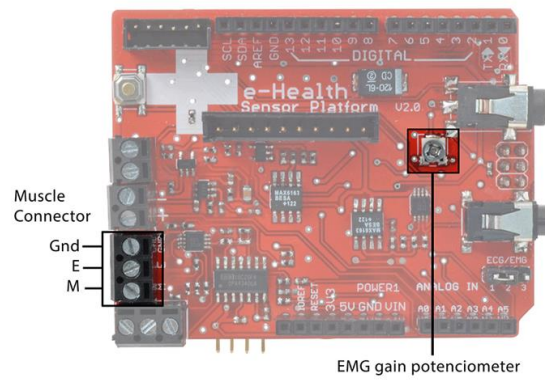


Imagen 13: e-Health Sensor Shield V2

## CAPITULO II

### 2. DISEÑO DE LA PRÓTESIS, ALGORITMOS E IMPLEMENTACIÓN DE DATOS TEÓRICOS

#### 2.1 Servomotor elegido

Diseño mecánico por medio del software Solidworks de una prótesis para miembro superior con tres grados de libertad con servomotores.

En el mercado existen varios tipos de motores los mismos que difieren en tamaño, torque, velocidad, para este diseño de prótesis se eligió el Servo MG90S (Imagen 14 y 15), el cual cumple con los requerimientos necesarios.

El MG90S está muy difundido en el mercado colombiano, por sus características de tamaño y torque A continuación, se presenta las características del servomotor



Imagen 14: Diseño del servomotor en Solidworks

- Peso: 13,4 g
- Dimensión: 22,5 x 12 x 35,5
- Par de torsión: 1.8 kgf · cm (4.8V)
- Velocidad de funcionamiento: 0,1 s / 60 grados
- Tensión de servicio: 4,8 V -
- Anchura de banda muerta: 5  $\mu$ s



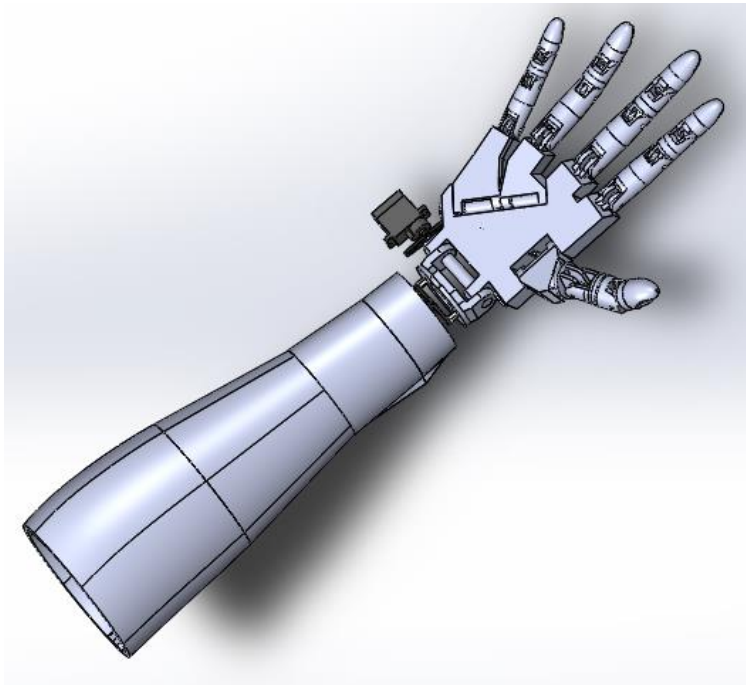
*Imagen 15: Proporcionada por el Datasheet del servomotor escogido*

## 2.2 Diseño de la prótesis robótica en el software Solidworks

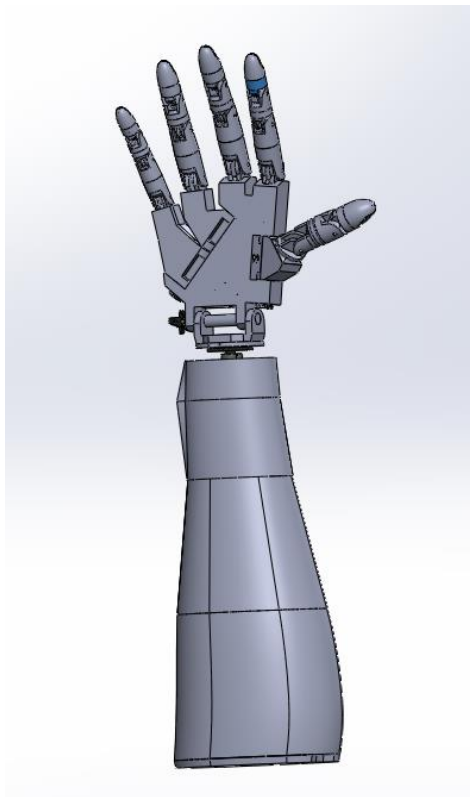
La herramienta utilizada para este proyecto es Solidworks, que brindan acabados precisos y perfectos, además de ser de fácil acceso en nuestra comunidad, sencillo manejo para cualquier persona.

La construcción de un prototipo requiere de pruebas de cada material, de los principios mecánicos de transmisión de movimiento, y sobre todo de la ubicación de cada una de la pieza, el diseño utilizado en este proyecto de grado es tomado de la página web GrabCad, cortesía del usuario Metin Dgn. A continuación, se presenta el diseño de la prótesis en Solidworks, donde se ubica los servos y cada parte ósea de la mano hasta llegar al antebrazo.

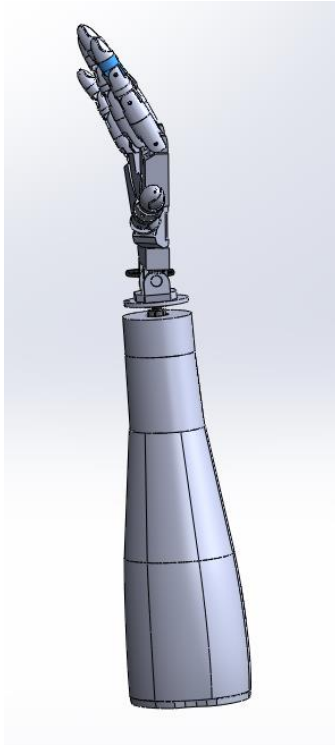




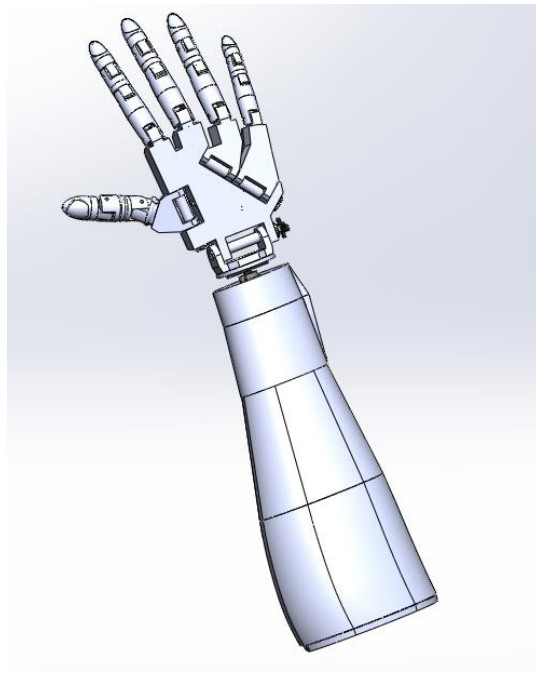
*Imagen 16: Diseño de Prótesis Robótica en Solidworks*



*Imagen 17: Diseño de Prótesis Robótica en Solidworks*



*Imagen 18: Diseño de Prótesis Robótica en Solidworks, vista lateral.*



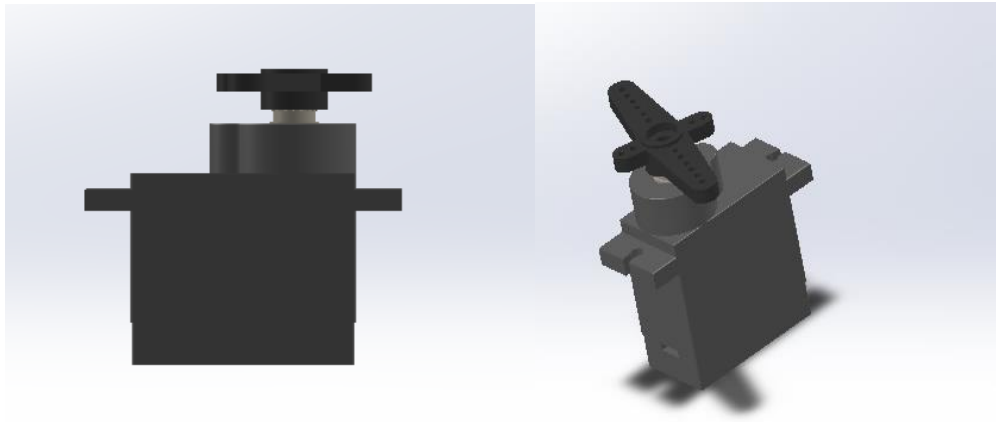
*Imagen 19: Diseño de Prótesis Robótica en Solidworks, Vista Trasera.*

### 2.3 Piezas en Solidworks

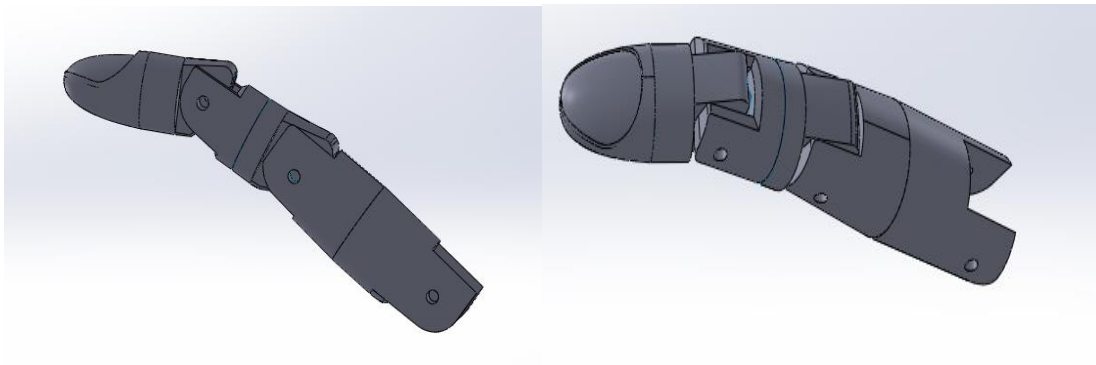
Las piezas en el software de diseño mecánico hacen parte del ensamble mostrados anteriormente, en el cual se podrán encontrar el actuador, los dedos, pines y parte de la palma en analogía con una mano real, como se ve en las imágenes 20,21.

En los anexos, se recopila información de inmediata aplicación referida al control mediante placas Arduino® de los accionamientos de que consta la mano, y siendo elegido gracias a la versatilidad y sencillez que ofrece esta herramienta de código abierto.

En la etapa final del proyecto se lleva a cabo la generación y el tratamiento de todos los archivos y planos necesarios para su futura posible materialización usando la tecnología de impresión en 3D disponible.



*Imagen 20: Servomotor MG90S, actuador que dará movimiento a la mano, dedos y muñeca*



*Imagen 21: Diseño gráfico de los dedos de la mano robótica*

## 2.4 Algoritmos de los programas utilizados para adquirir la señal electromiografía

A continuación, se presentará el algoritmo usado en Arduino y el de Matlab forma parcial.

El algoritmo base de Arduino, trabaja la comunicación 115200 baudios, por medio de la librería eHealth.h la cual obtiene la señal que se genera y se guarda en una variable. Los datos se pueden observar en Monitor Serie o gráficamente en Serial

El siguiente código fue el utilizado en la adquisición de datos de Arduino a Matlab, para el análisis y almacenamiento de las señales generadas para pruebas durante este proceso. Este programa crea dos funciones un tipo vector para almacenar los datos y la graficar en forma de seno; cada 0,2 ms se llama la función graficar. De igual forma se crean botones por medio del GUI de Matlab donde se coloca los nombres de Adquirir, Stop y guardar, además de un pequeño display donde se presenta los valores que se dan en el momento. Este código se puede observar más detallado en anexos de algoritmos.

Se presenta el algoritmo creado en Matlab en forma de diagrama de flujos.

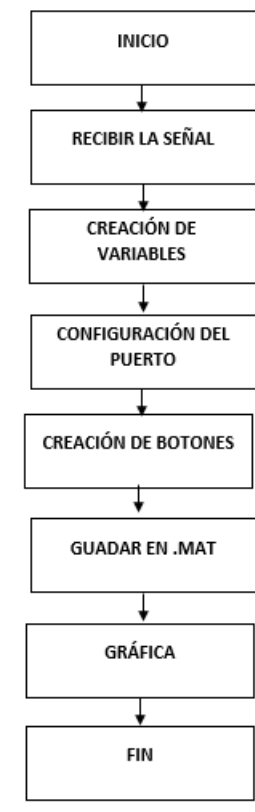


Imagen 22: Diagrama de Flujos

## 2.5 Control de los servos a partir del voltaje que genera la señal

Se simula la señal adquirida por el Arduino y por el Shield del Kit e- Health por medio de Proteus, logrando mostrar el movimiento de avance del servo en cierto voltaje, pero también su movimiento de retorno a su posición inicial al llegar a un valor de voltaje determinado usando solo comunicación con el Arduino. Este algoritmo por medio de la librería del e-Health y del Servo permiten o impiden el movimiento del servo, que dependiendo de los valores de la señal la cual se almacenan en la variable EMG, todo esto es controlado cuando la variable es evaluada en los condicionales. El código se muestra en el anexo de algoritmos.

La simulación de este movimiento se realizó por medio del software de simulación Proteus, como se presenta a continuación se simuló con un servomotor y un potenciómetro debido a no poder usar los datos de EMG en este software, donde cada vez que variaba el potenciómetro variaba directamente el voltaje; el algoritmo creado evaluaría entre los condicionales creados en este programa y ejecutaría lo que se encuentre adentro de este, puede ser avance o retroceso del movimiento del actuador. Esta simulación se observa en la imagen 23,24.

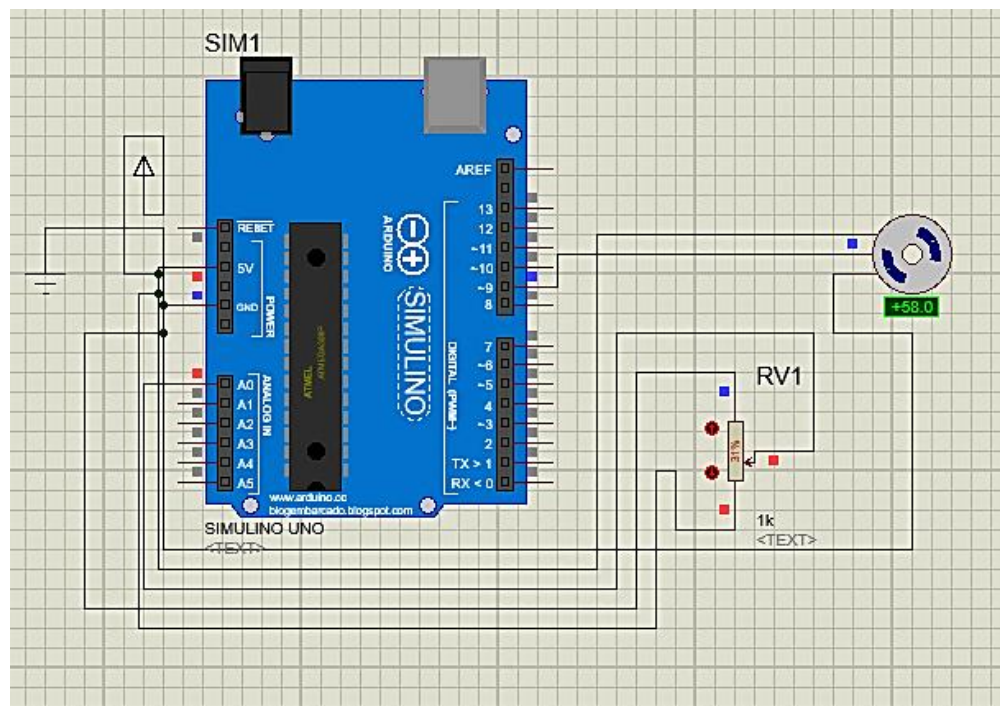


Imagen 23: Simulación del servo a partir de la señal que se genere en un movimiento

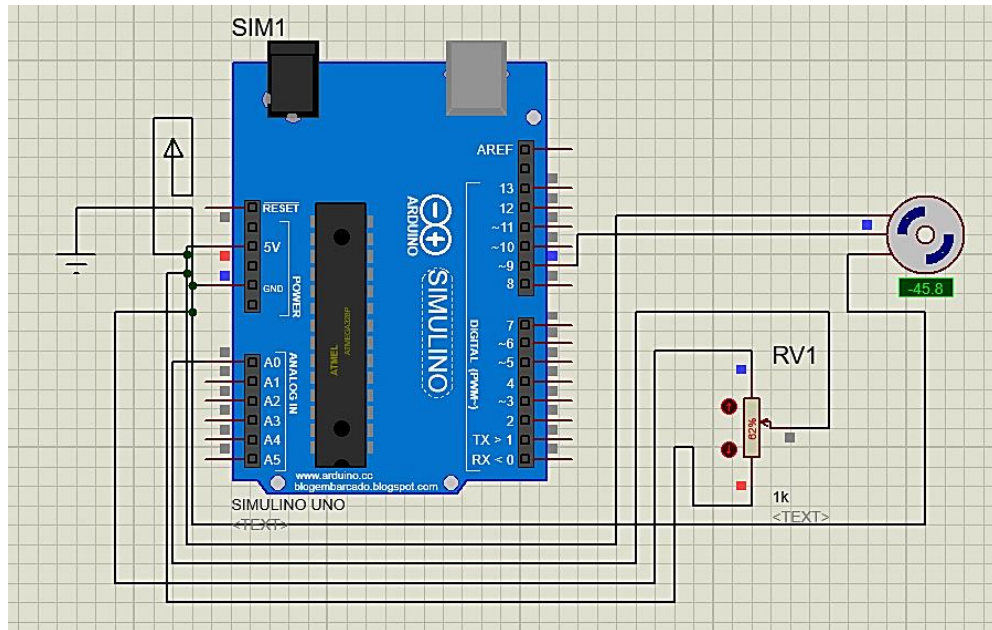


Imagen 24: Simulación del servo a partir de la señal que se genere en un movimiento

## 2.6 Cálculos teóricos cinemáticos

La velocidad angular que lleva el servomotor es de  $2.78 \times 10^{-4} \frac{rad}{s}$ , en base a este dato y a distancias tomadas, se realizaran cálculos de velocidades lineales y relativas con respecto a dedos, las muñecas o cualquier distancia otra que nos pueda brindar información útil para este proyecto.

$$W = 2.78 \times 10^{-4} \frac{rad}{s} \text{ (velocidad del actuador)}$$

La velocidad con la que los dedos se mueven al cerrarse o abrirse es de la anteriormente mencionada ya que se encuentran relacionados directamente.

Se desea conocer la velocidad relativa entre el dedo meñique y los servos ubicado en el lado lateral (Vl) y en la muñeca (Vm).

$$V = W \times r \quad (3)$$

V= Velocidad lineal

W= velocidad angular

R= distancia

$$V_m = 2.78 \times 10^{-4} \frac{rad}{s} \times 176,64 \text{ mm}$$

$$V_m = 0.049 \frac{mm}{s}$$

$$V_l = 2.78 \times 10^{-4} \frac{rad}{s} \times 154.64 \text{ mm}$$

$$V_l = 0.042 \frac{mm}{s}$$

La velocidad relativa de  $V_m$   $V_l$  seria:

$$\frac{V_m}{l} = V_m - V_l \quad (4)$$

$$V_{m/l} = 0.049 \frac{mm}{s} - 0.042 \frac{mm}{s}$$

$$V_{m/l} = 0.007 \frac{mm}{s}$$

Velocidad de giro en la muñeca (GDL)

$$V_1 = 2.78 \times 10^{-4} \frac{rad}{s} \times 49 \text{ mm}$$

$$V_1 = 0.01362 \frac{mm}{s}$$

Velocidad de giro en flexión y extensión de la mano (GDL)

$$V_2 = 2.78 \times 10^{-4} \frac{rad}{s} \times 96.25 \text{ mm}$$

$$V_1 = 0.02676 \frac{mm}{s}$$

### CAPITULO III

#### ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL

La adquisición de la señal se logra a partir de la plataforma e-Health y dos softwares importantes, Arduino que adquiere la señal conectando los tres cables (positivo, negativo y neutro) en la tarjeta e-Health en el cual se Conectan el electrodo ECG a los electrodos (ver Imagen 25), esta señal luego es pasada a Matlab el cual en este software permite adquirirla por comunicación serial, pausarla y guardarla la señal en cierto formato conveniente para el proyecto en este caso es. mat, se obtuvo 30 series de datos con 501 elementos cada uno a diferentes músculos y haciendo diferentes movimientos se puede determinar la señal al contraer o relajar el musculo



*Imagen 25: Conexión de los electrodos a la tarjeta e-Health V2.0 para la adquisición de la señal.*

*Cortesía de Cooking Hacks, <https://goo.gl/7H38y3>.*

La conexión de los electrodos en el brazo para tener una señal válida para este proyecto es similar a la imagen 26, en este caso de la se tomaría señales en el bíceps. En otra toma de señal en diferentes músculos seria colocar el electrodo E Y M en el sitio que se quiere a cierta distancia y el tercer electrodo que es GND o referencia en un musculo diferente



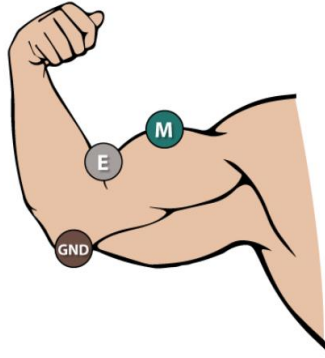


Imagen 26: Ubicación de los electrodos en el musculo.

Cortesía de Cooking Hacks, <https://goo.gl/7H38y3>.

Los códigos utilizados se encuentran ubicados en Anexos 2, Programas.

Las señales adquiridas en Matlab, se muestran a continuación (imagen 27-30) como ejemplo de algunas que se obtuvieron durante el proceso:

Se puede determinar el valor en voltajes de las Imágenes de la 28 a la 30 por ejemplo; se determinaría cada pico que se da en las señales por medio de la siguiente ecuación.

$$V = \frac{Valor * 5 V}{1024} \quad (5)$$

Esta información es importante ya que permite el control del actuador para el movimiento de la mano, dedos y giros de la muñeca, además de dar una idea analítica del comportamiento de las señales generadas al realizar movimientos.

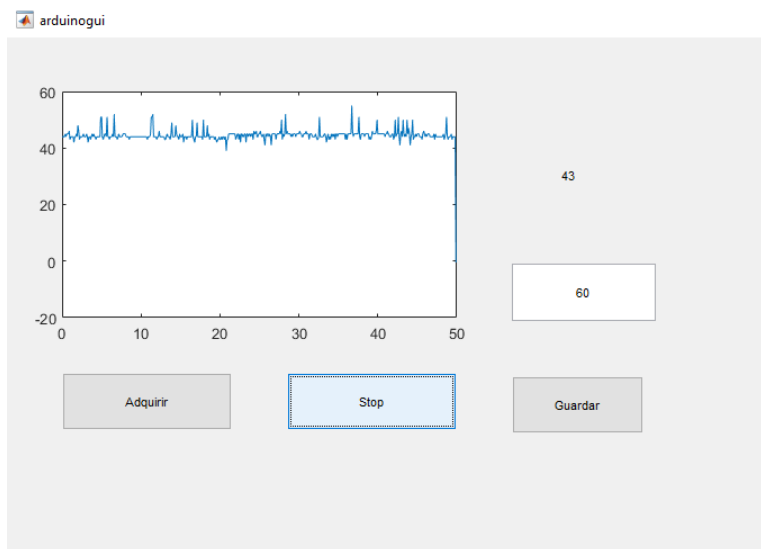
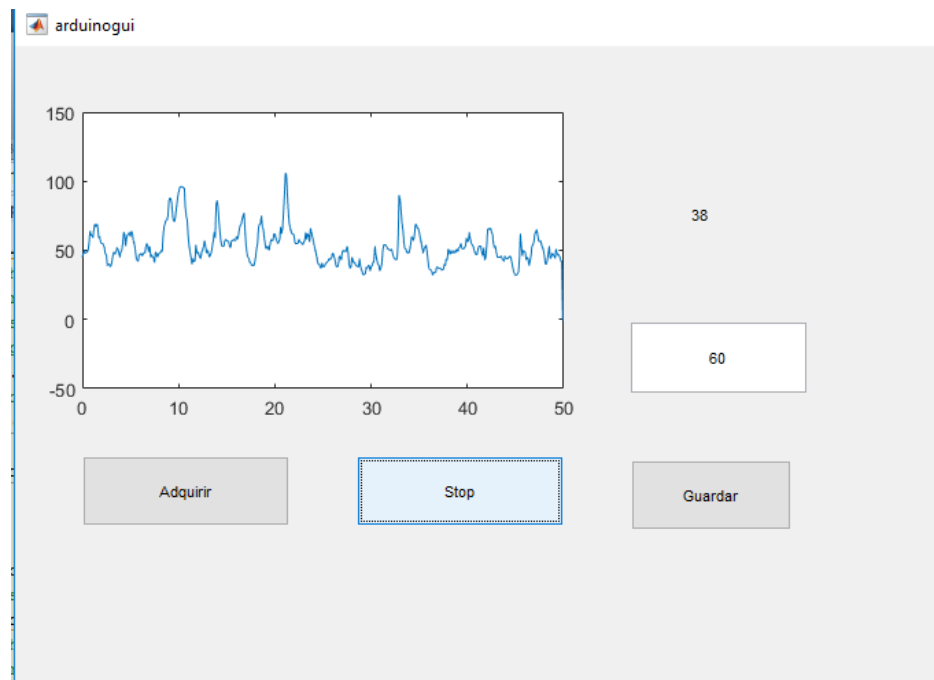


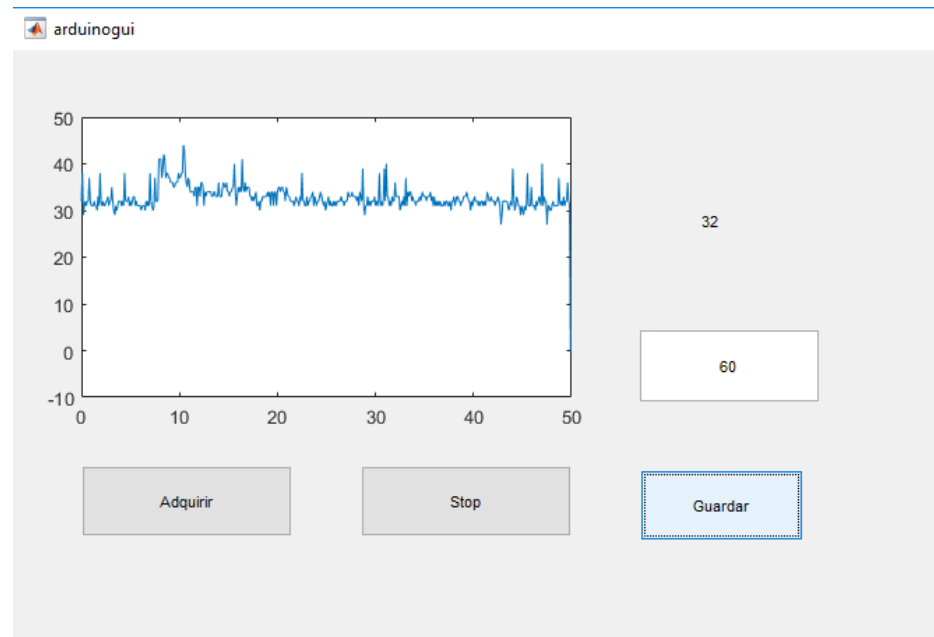
Imagen 27: Gráfico de la señal al contraer el brazo

Electrodos ubicados en el bíceps



*Imagen 28: Gráfico de la señal al hacer movimientos el brazo*

*Electrodos ubicados en el bíceps*



*Imagen 29: Gráfico de la señal al contraer y soltar el brazo*

*Electrodos ubicados en el bíceps*

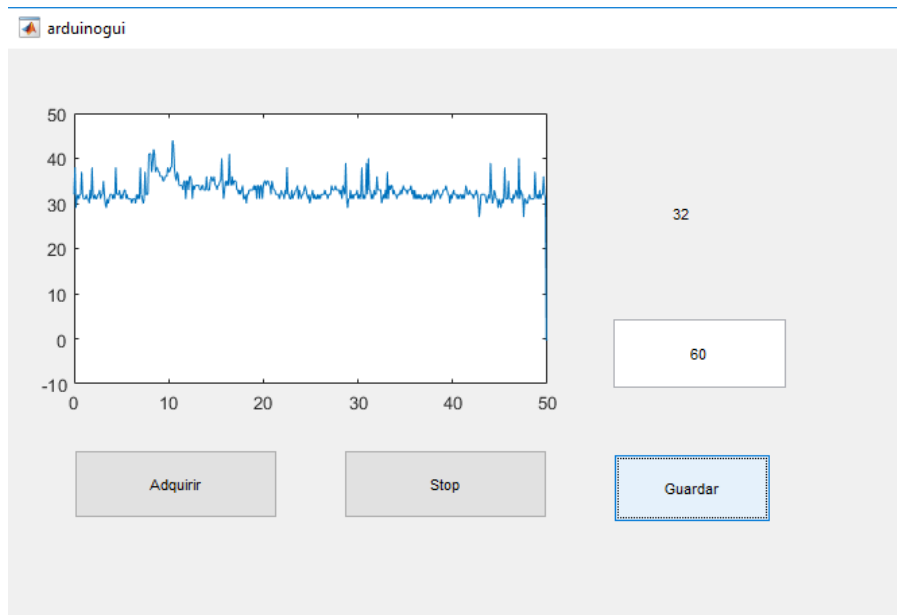


Imagen 30: Gráfico de la señal al soltar el brazo

Electrodos ubicados en el bíceps

## Presupuesto

CANTIDAD	NOMBRE	ADQUIRIDO	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Arduino Uno o Mega	X	\$ 28.560,00	\$ 28.560,00
1	Servomotor MG90S	X	\$ 29.790,00	\$ 29.790,00
	Papelería	X	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
1	Electrodos desechables (Pack)		\$ 59.900,00	\$ 59.900,00
1	Renu solución multiuso sensibles		\$ 15.000,00	\$ 15.000,00
1	e-health Biometric	X	\$ 144.000,00	\$ 144.000,00
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 143.250,00</b>

Tabla 1: PRESUPUESTO

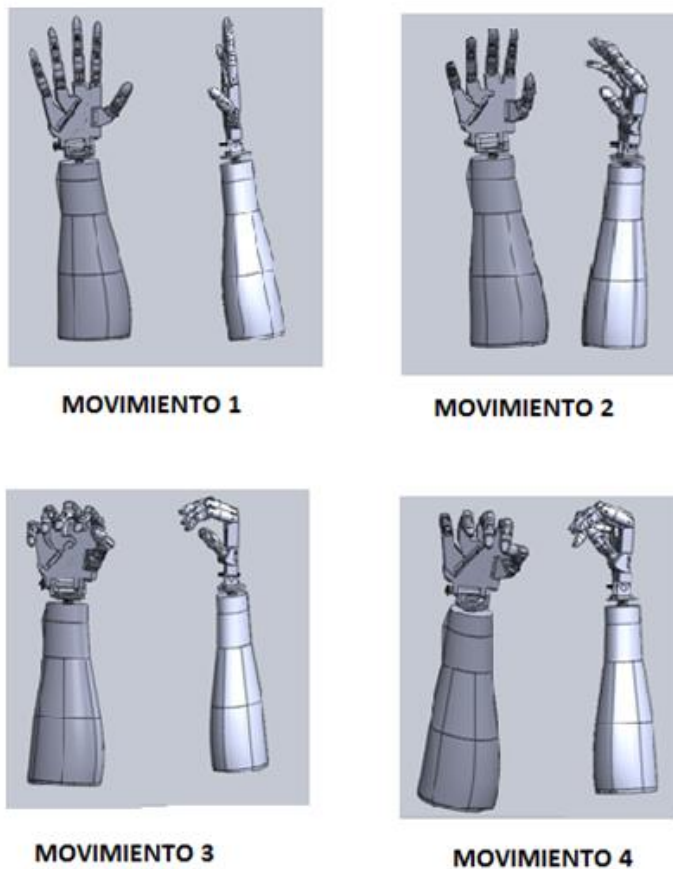
## CAPITULO IV

### SIMULACIÓN, RESULTADO, RECOMENDACIÓN Y CONCLUSIÓN

#### 5.1 Simulación de movimiento en el software de diseño mecánico

Con el objetivo de simular los 3 grados de libertad de la mano robotica se hace una secuencia de imágenes donde se puede observar los tipos de movimiento que pueden lograr los dedos al ser accionados por los servomotores, en esta protesis en particular se complementa este movimiento con hilos que nos permitan llevar acabo esto, ver imagen 31.

#### MOVIMIENTO DE LOS DEDOS GRADO DE LIBERTAD 1

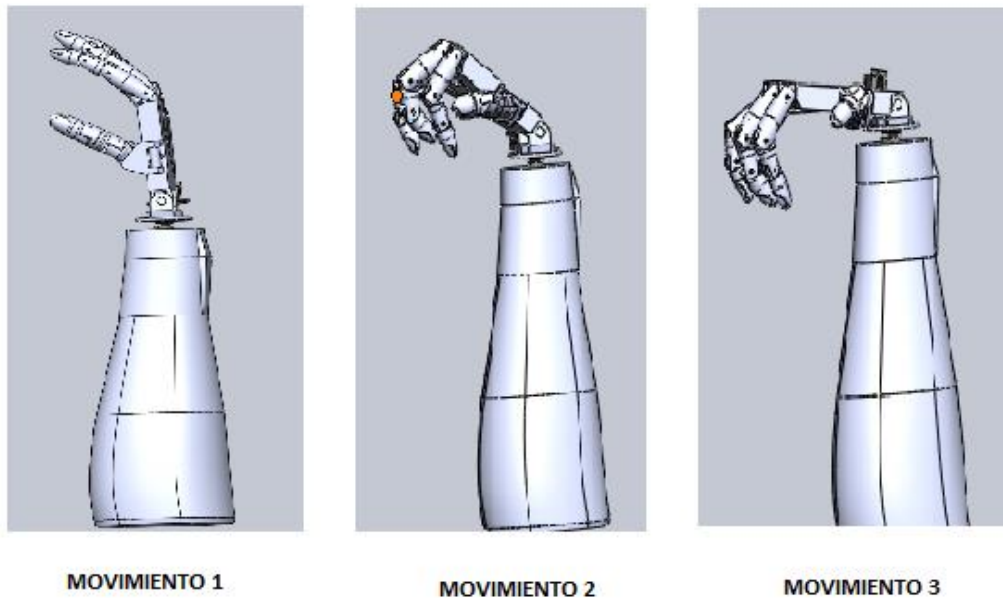


*Imagen 31: Simulación de movimientos de los dedos*

En la siguiente imagen se mostrara otro grado de libertad de una forma analoga es flexionar y extender la muñeca , este movimiento se da por el servomotor que se encuentra del lado lateral de la mano, produciendose este cambio de posición en la muñeca cada vez que se genere la señal adecuada y establecida para que se de este grado de libertad, ver imagen 32

## **FLEXIÓN DE LA MUÑECA**

### **GRADO DE LIBERTAD 2**



*Imagen 32: Flexión de la muñeca de la mano*

El tercer grado de libertad diseñado para esta mano robotica es girar de derecha-izquierda y en sentido contrario, el actuador encargado de este movimiento esta ubicado en la mitad de la muñeca, imagen 33

### GIRO DE LA MUÑECA

GRADO DE LIBERTAD 3

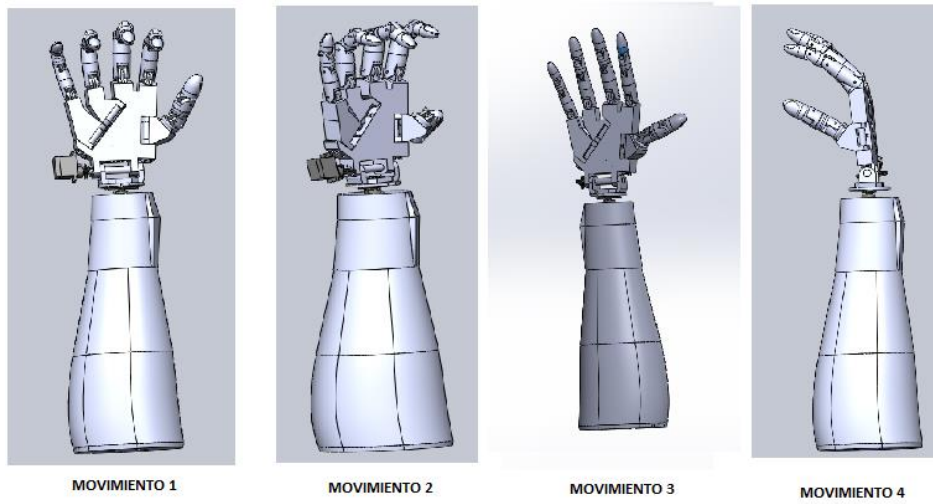


Imagen 33: Giro de la muñeca

## 5.2 RESULTADOS

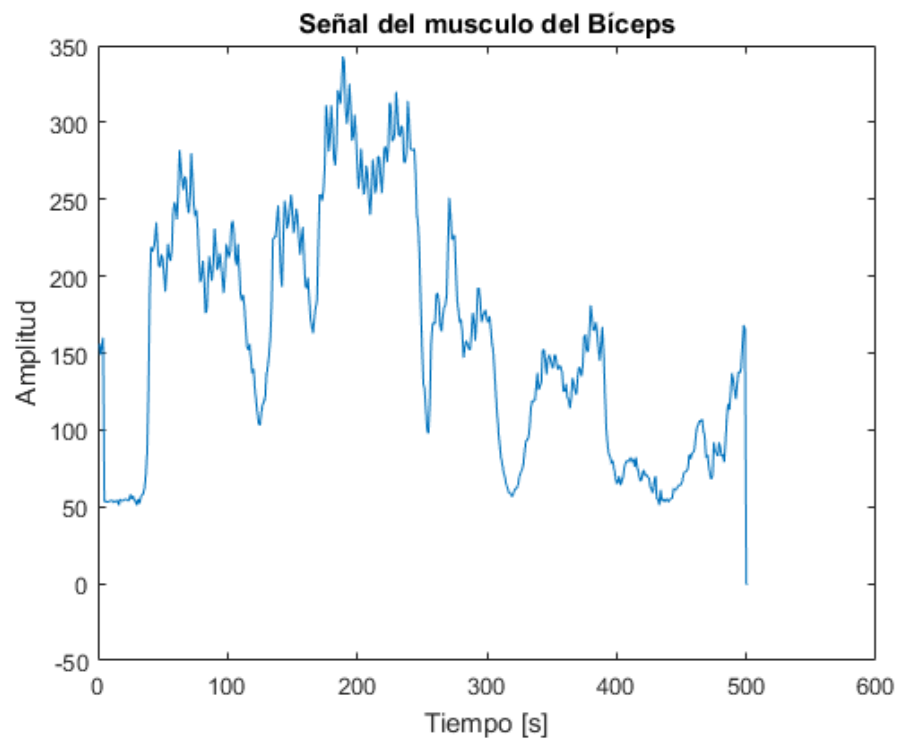
- El modelo implementado se basó en diseño escogió de Grabcad, el cual cumplía con las especificaciones básicas requeridas. Sin embargo, fue modificado incluyéndole un movimiento por servomotores y las relaciones de movimiento, este diseño tiene 3 grados de libertad los cuales son: movimiento de dedos, flexión, extensión y giro de la muñeca. Se planea que el material de construcción de dicha prótesis sea PLA (El políácido láctico) o ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), los cuales son materiales comunes en impresoras 3D.
- Basado en el estudio cinemático teórico realizado las velocidades relativas con base en el servomotor escogido son por ejemplo de  $V \frac{M}{L} = 0.007 \frac{mm}{s}$  (velocidad del servo de la muñeca con respecto a la del actuador lateral), con una velocidad máxima del servo, sin embargo se deja una opción de regulación de estas velocidades por medio de software para cada usuario diferente. También es posible implementar esta reducción por medio de mecanismos de engranaje, pero dicha opción no se contempló en este proyecto.
- Se desarrolló un protocolo de adquisición de señales de EMG de 4 músculos (Bíceps, deltoides, trapecio, tríceps,) que pueden servir como una señal de activación para el control de la prótesis, se tomaron 30 series de datos de un tamaño de 501 elementos para cada musculo en un solo individuo, debido a las limitaciones del proyecto, estas señales sirvieron para el proceso de

simulación del movimiento de la prótesis, también servirán como base de datos para una futura continuación del proyecto.

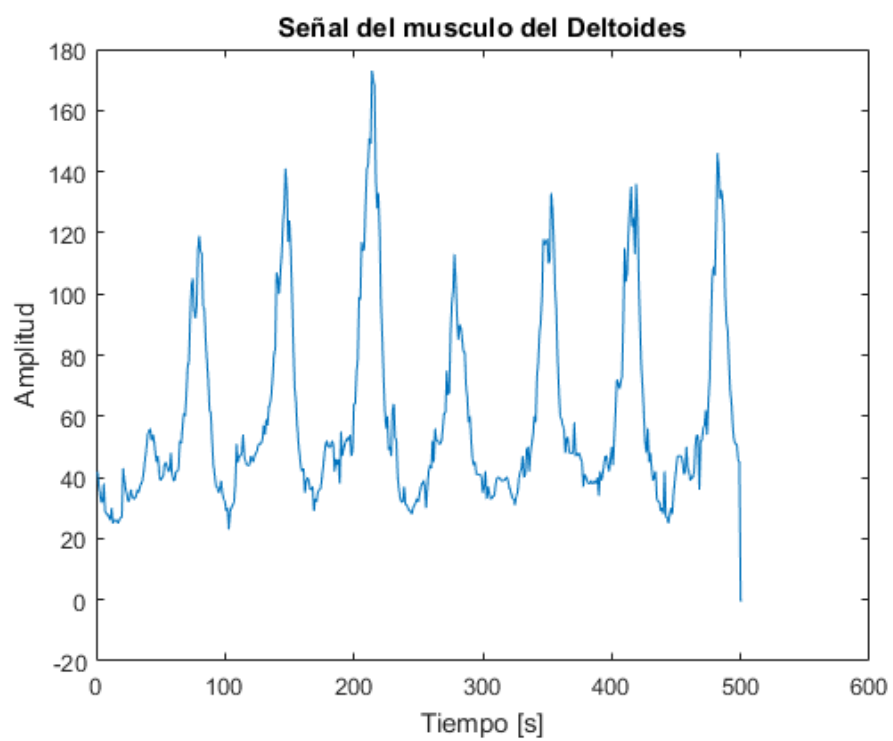
- En lo referente a la caracterización de las señales de electromiografía, se encontró que el máximo valor de voltaje promedio para los distintos músculos analizados fue: Bicep:1.6, deltoides:1.4, trapecio:0.2, tricep:0.3, estos datos sirven para determinar el umbral de activación y desactivación de los servos el cual se escogió que fuera entre un 50% a un 30% del valor máximo. Pero se encontraron variaciones en estos valores al utilizar distintas plataformas e-Health, computadores distintos y el hecho de estar conectado a la red eléctrica o usar baterías en el caso de computadores portátiles, por lo tanto, el valor del umbral varía según estas condiciones, sin embargo, la plataforma e-Health tiene un potenciómetro de ganancia que puede ayudar a limitar este efecto.
- Se realizó tres softwares de simulación de la activación de los servomotores con base en una señal de entrada ya sea en tiempo real como adquirida de la base de datos o simulada por otros medios como la variación de voltaje de un potenciómetro. Fueron desarrollados en Matlab, Arduino y Proteus, estas simulaciones ayudaron a refinar el valor del umbral de activación, así como la programación de los servos y el cambio de velocidad por software.
- En cada musculo de la parte superior o cercana a brazo se conectaron los electrodos y se obtuvo al final una tabla donde se tabularon los valores obtenidos en varias pruebas que se les hicieron a los músculos cambiando de movimientos, donde al final se graficó y logro una señal de tiempo contra amplitud.

AMPLITUD DE SEÑALES ELECTROMIOGRAFICAS						PROMEDIO	DESVIACIÓN	VOLTAJES MAX.
BICEP	338	308	176	54	27	180	134,7	1.6
DELTOIDES	288	203	181	101	85	172	93,4	1.4
TRAPECIO	42	40	38	29	27	35	14,4	0.2
TRICEP	69	61	59	57	56	60	23,3	0.3

Tabla 2: Amplitud de Señales Electromiografías

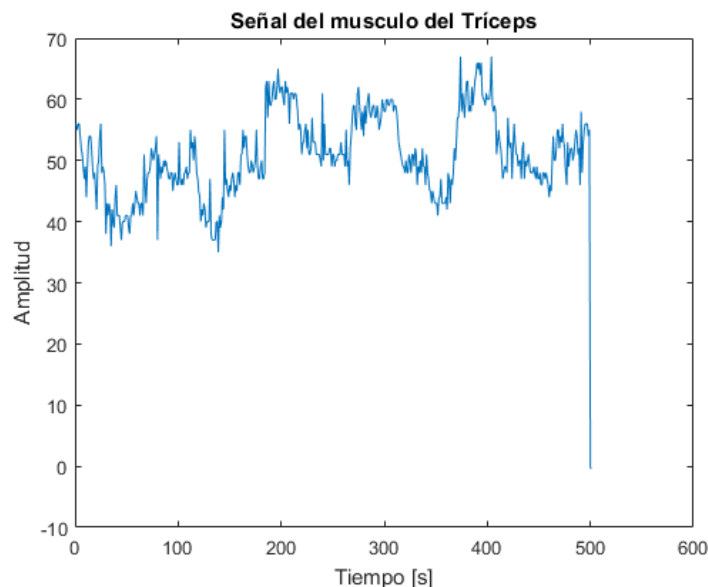


*Imagen 34: Señal del bíceps*



*Imagen 35: Señal del Deltoides*





*Imagen 36: Señal del Tríceps*

### 5.3 Recomendaciones

- Tener conocimiento básico en el manejo de Solidworks, para facilitar la interpretación de los planos, como también hacer posible el diseño propio sobre diseño básico del mano tomado.
- De igual manera es esencial el manejo de un lenguaje de programación, en este caso se utilizó Arduino para la adquisición de datos y Matlab para tratamiento de la señal.
- Importante tener un buen estado del arte para un desarrollo ideal en el trabajado de grado y tener la capacidad de tomar decisiones.
- Los cálculos teóricos en función a los datos de los actuadores, nos ayudan a tener conocimiento del comportamiento en de la prótesis en estado físico.

### 5.4 Conclusiones

- Se diseñó un modelo mecánico de una prótesis con 3 grados de libertad (movimiento de dedos, flexión, extensión y giro de la muñeca), ubicando los actuadores de forma que se cumpla con el objetivo del movimiento, por medio de un software CAD 3D, para nuestro caso fue Solidworks.
- Estudio cinemático del movimiento de los grados de libertad en base a la velocidad que tiene el servomotor de fábrica, hallando así velocidades angulares y velocidades relativas y absolutas de diferentes lugares, como por

ejemplo la velocidad en el servomotor ubicado en la muñeca respecto a la velocidad que lleva los dedos al moverse este actuador (velocidad relativa).

- La velocidad del servomotor se controla desde la programación inicial, proponiendo una velocidad de aceleración progresiva hasta llegar a ser constante durante el movimiento ejecutado.
- El proceso de adquisición de datos que se estableció a partir del estudio y practica en este proyecto fue el siguiente:
  1. Ubicación de los electrodos en el brazo o espalda alta.
  2. Conexión de la plataforma e-Healt a la placa de Arduino (cabe mencionar que esta shield de e-Healt funciona solo con la versión 1.0.6 de Arduino).
  3. Establecer el enlace entre Arduino y Matlab, para la adquisición de los datos, guardándolos en. mat, y si es necesario darle un tratamiento a la señal.
  4. Conectar el servomotor a la placa de Arduino.
  5. Ubicación de los actuadores en la prótesis mecánica.
- Las simulaciones se realizaron por medio de Solidworks y Proteus, ya que no se llevó el prototipo a un estado físico, pero por medio de estos dos softwares se pudo observar que cumplen con los parámetros que se quisieron de diseño, y el movimiento que por intermedio de los datos generados por la electromiografía se puede llevar al control de ella.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Organización Mundial de la Salud, «Discapacidad y salud,» noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs352/es/>.

[2] Centro de Robótica e Informática, «Instituto de Robótica para la dependencia,» Universidad Jorge Tadeo Lozano, [En línea]. Available: <https://institutorobotica.org/sobre-nosotros/>. [Último acceso: 24 Mar 2017].

[3] Centro Virtual de Noticias, «Ministerio de Educación Nacional,» abril 2008. [En línea]. Available: <http://www.mineduacion.gov.co/cvn/1665/article-159268.html>. [Último acceso: 2017 Mar 24].

[4] Pinzón, J. V., Mayorga, R. P., & Hurtado, «Brazo robótico controlado por electromiografía,» Scientia Et Technica, nº 52, pp. 165-173, 2012.

[5] Campus 2.0: Noticias, Eventos y Opinión, «Universidad la Sabana,» 17 Feb 2015. [En línea]. Available: <http://www.unisabana.edu.co/nc/la-sabana/campus-20/noticia/articulo/lokomat-en-la-clinica-universidad-de-la-sabana>. [Último acceso: 24 marzo 2017].

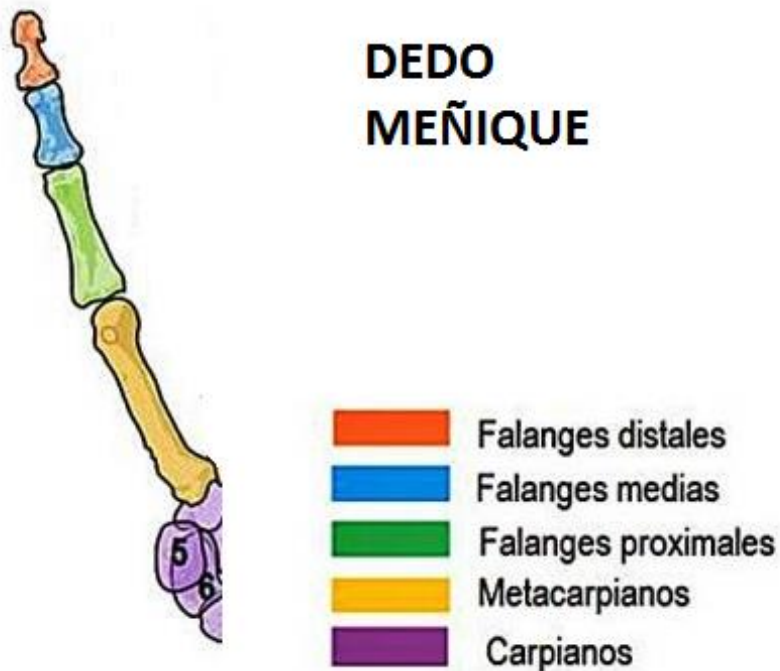
- [6] D. L. J. H. Rosa-Peréz, «Semiología de antebrazo, muñeca y mano,» [En línea]. Available: [http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bio/semiologia\\_muneca\\_y\\_mano.pdf](http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bio/semiologia_muneca_y_mano.pdf). [Último acceso: 15 8 2017].
- [7] G. Trebes, «Prótesis del miembro superior: entrenamiento fisioterápico del amputado,» Toray, 1973.
- [8] B. S. Griñó, «Diseño mecánico de prótesis de mano multidedo antropomórfica infractuada.» Castellón, 2015.
- [9] E. N. Marieb, Anatomía y fisiología humana, Madrid, España.: Pearson Addison Wesley, 2008.
- [10] Osorio, Laura Jimena, «Módulo de amputados,» 4 November 2009. [En línea]. Available: <http://www.elportaldelasalud.com/>. [Último acceso: 30 3 2017].
- [11] Dorador González, Jesús Manuel; «Robótica y prótesis inteligentes,» Revista Digital Universitaria, vol. • Volumen 6, nº 1, ISSN: 1067-6079, p. 15, 2004.
- [12] Velázquez Sánchez, «A. Velázquez Sánchez, E. Merchán Cruz, L. Hernández Gómez, GRango de movilidad y función descriptiva del dedo índice,» 2011.
- [13] J. L. D. L. Cruz-Oré, «¿Qué significan los grados de libertad?,» Revista Peruana de Epidemiología, Vols. %1 de %2vol. 17, núm. 2, pp. 1-6, pp. pp. 1-6agosto, 2013, agosto, 2013.
- [14] A. Avello, «Teoría de Máquinas,» Tecnun - Universidad de Navarra.
- [15] Towe, Bruce C., «Bioelectricity an It's Measurement,» de Standar Handbook of Medical Engineering and design, Mc-Graw-Hill, 2003.
- [16] Marco Pozzo, Dario Farina, Roberto Merletti, «Electromyography: Detection, Processing, and Applications,» de Biomedical Technology and Devices Handbook, CRC Press, 2004.
- [17] Cooking Hacks, «e-Health Sensor Platform V2.0 for Arduino and Raspberry Pi,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/ehealth-biometric-sensor-platform-arduino-raspberry-pi-medical>.

# ANEXOS

## ANEXOS 1

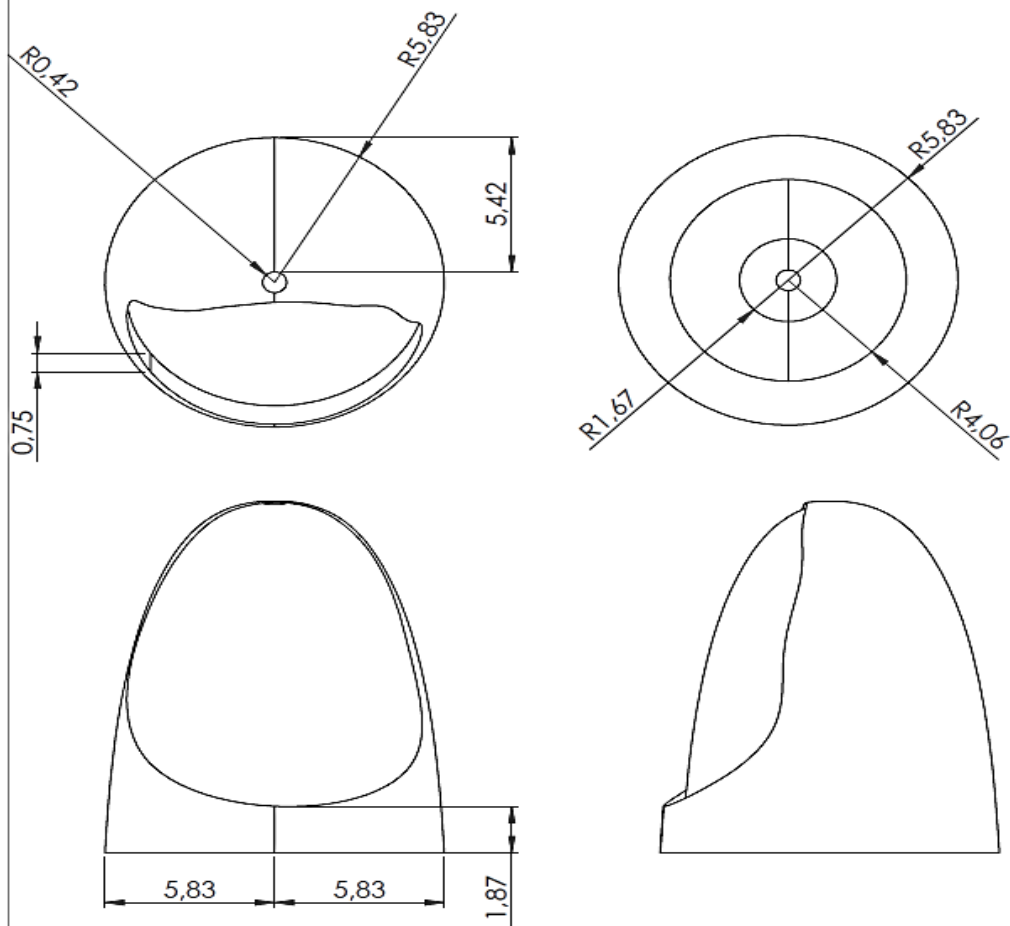
### 7.1 DISEÑO DE PRÓTESIS Y SIMULACIÓN

Los planos que se presentarán a continuación serán las partes del dedo meñique nombrado análogamente a los huesos de una mano humana, como falange distal, proximal, metacarpiana y media.

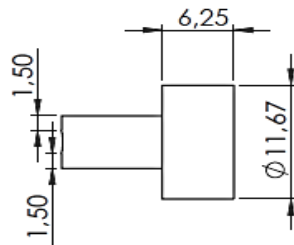
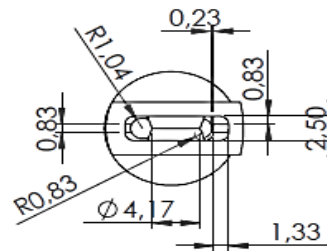
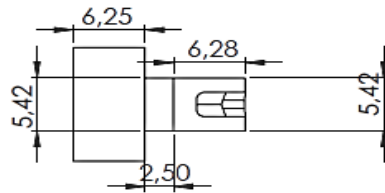
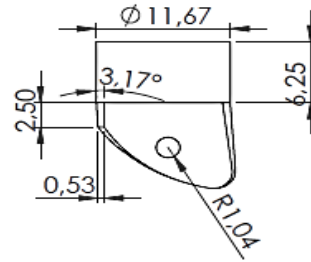


*Imagen 37: Dedo Meñique.*

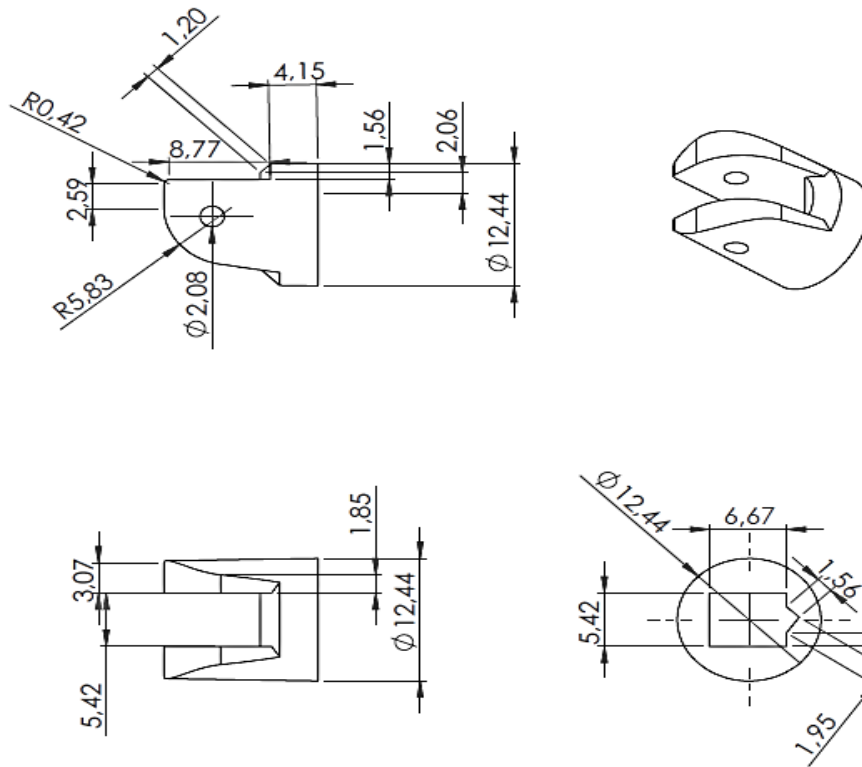
Cortesía de [<https://fisiostar.com/anatomia/articulaciones-de-la-mano>]



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE DISTAL, DEDO MEÑIQUE		PLANO N° 1
5:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

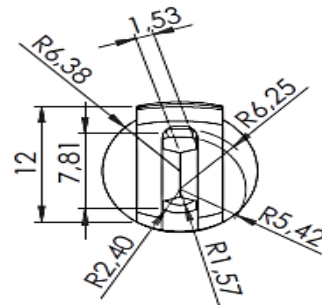
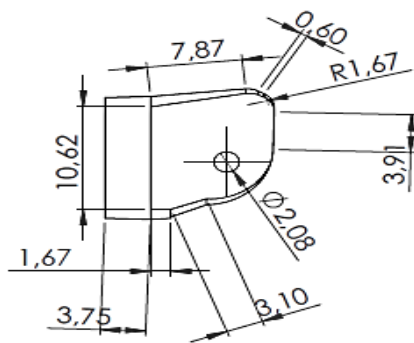
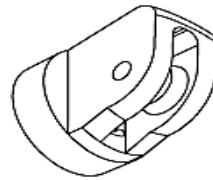
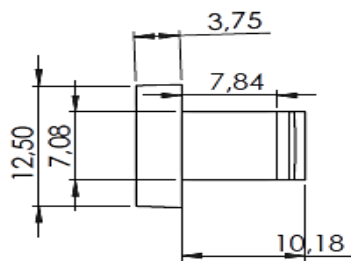


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE MEDIO, DEDO MEÑIQUE		PLANO N° 2
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECTRÓNICA		

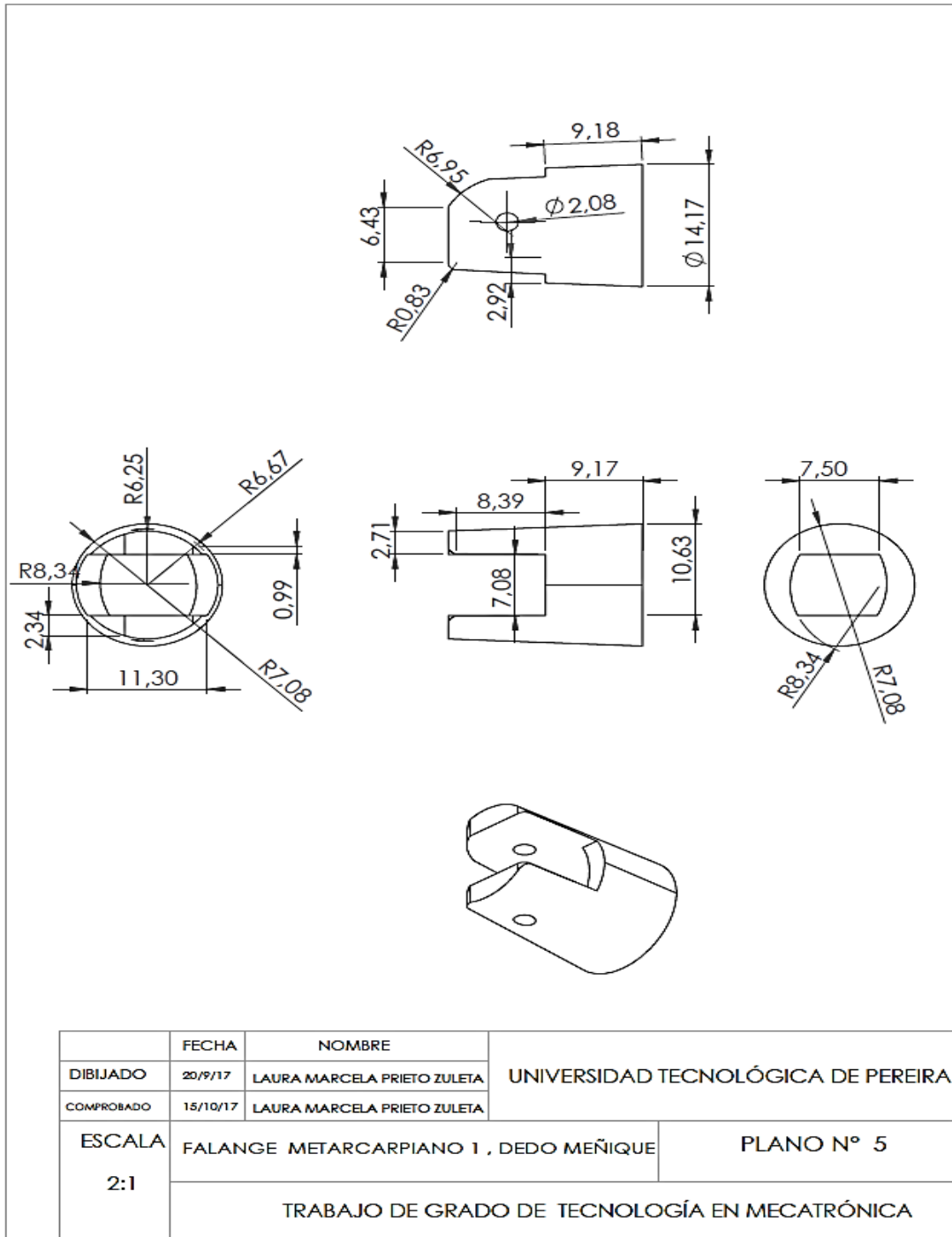


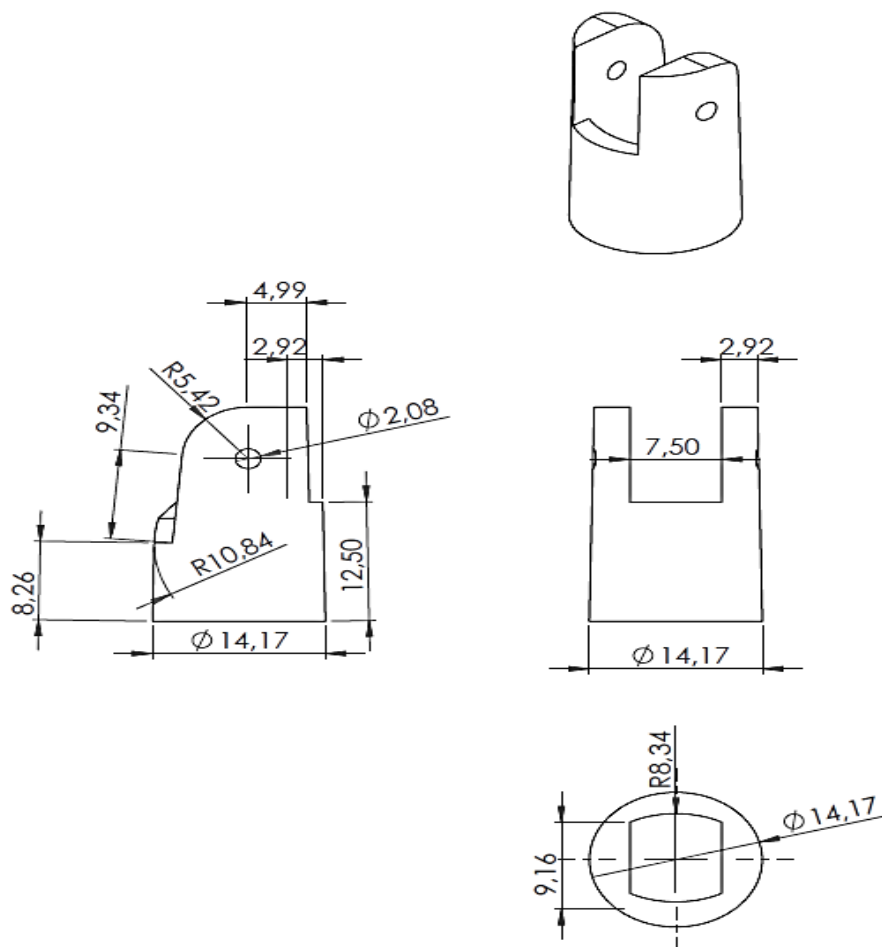
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE PROXIMAL 1, DEDO MEÑIQUE		PLANO N° 3
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECTRÓNICA		





	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE PROXIMAL 2, DEDO MEÑIQUE		PLANO N° 4
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		





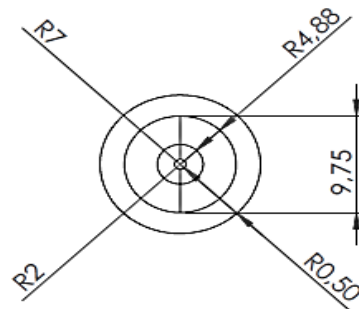
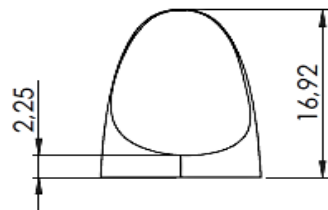
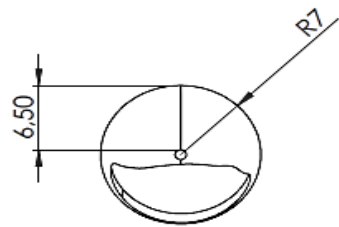
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE METARCARPIANO 2, DEDO MEÑIQUE		PLANO N° 6
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

Los siguientes planos que se presentarán serán las partes del dedo índice nombrada análogamente a los huesos de una mano humana, como falange distal, proximal, metacarpiano y media.

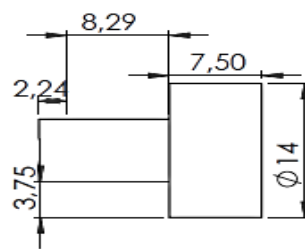
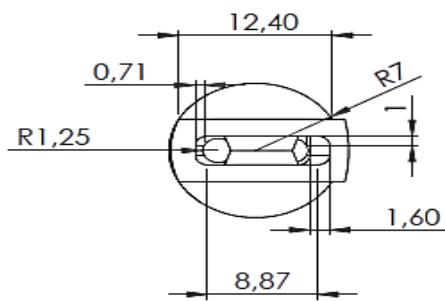
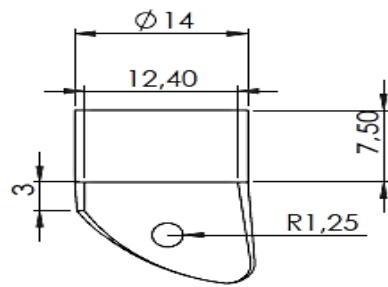


*Imagen 38: Dedo Índice.*

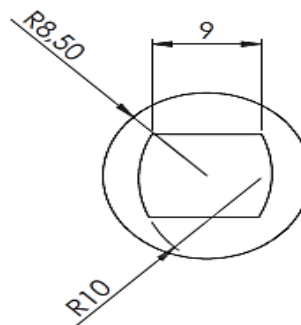
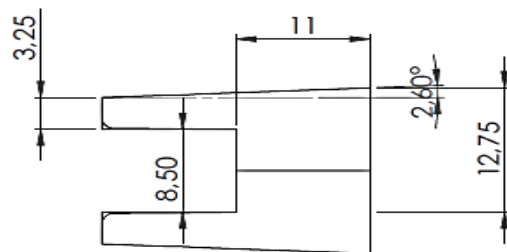
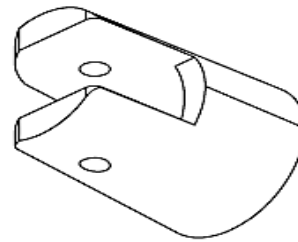
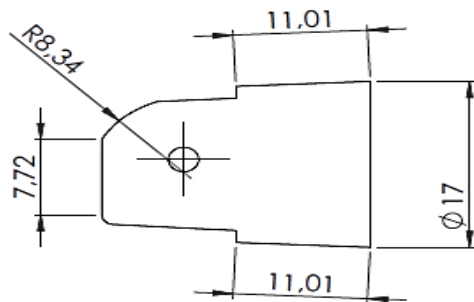
Cortesía de [<https://fisiostar.com/anatomia/articulaciones-de-la-mano>]



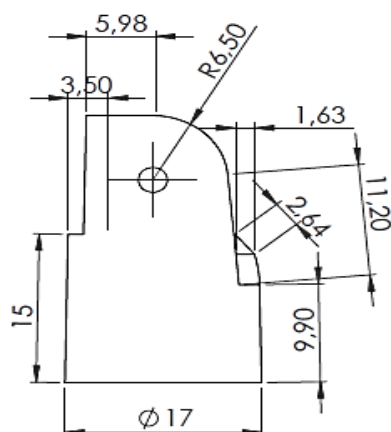
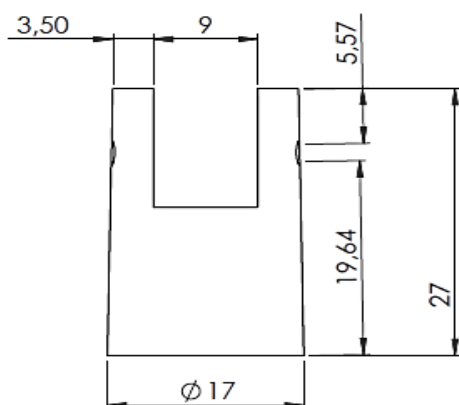
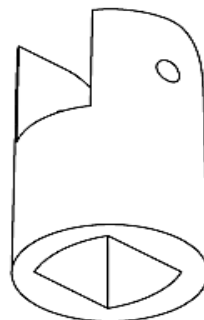
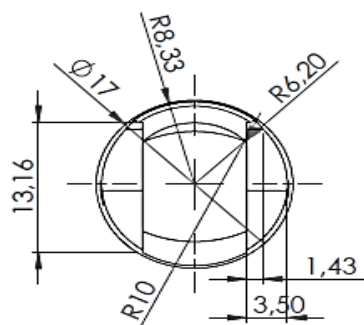
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE DISTAL, DEDO INDICE		PLANO N° 7
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECTRÓNICA		



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE MEDIA, DEDO INDICE		PLANO N° 8
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

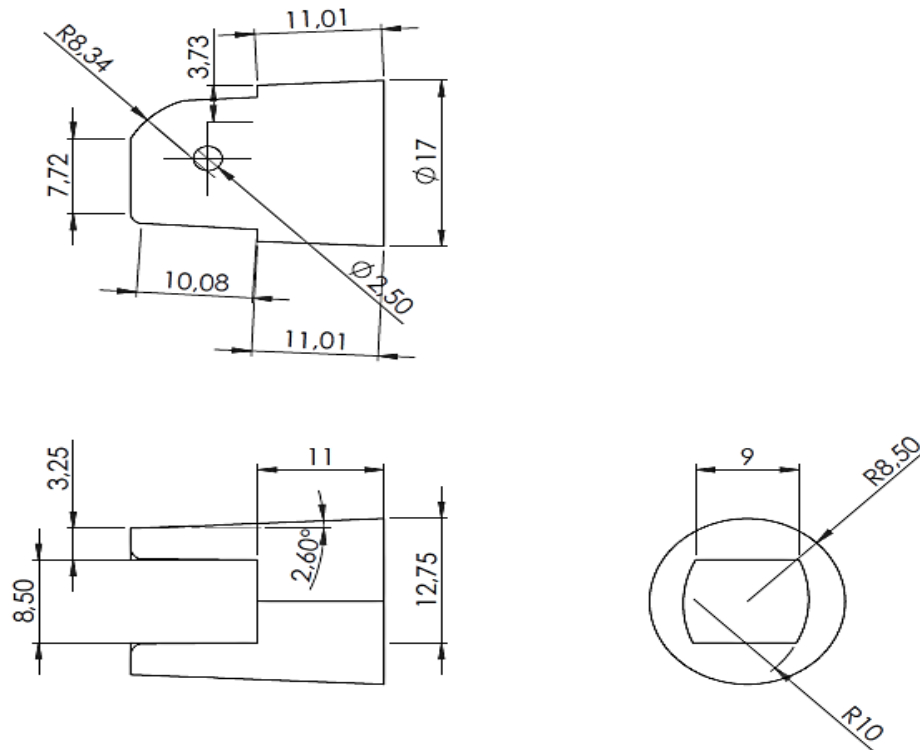


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE METARCARPIANO 1, DEDO INDICE		PLANO N° 9
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

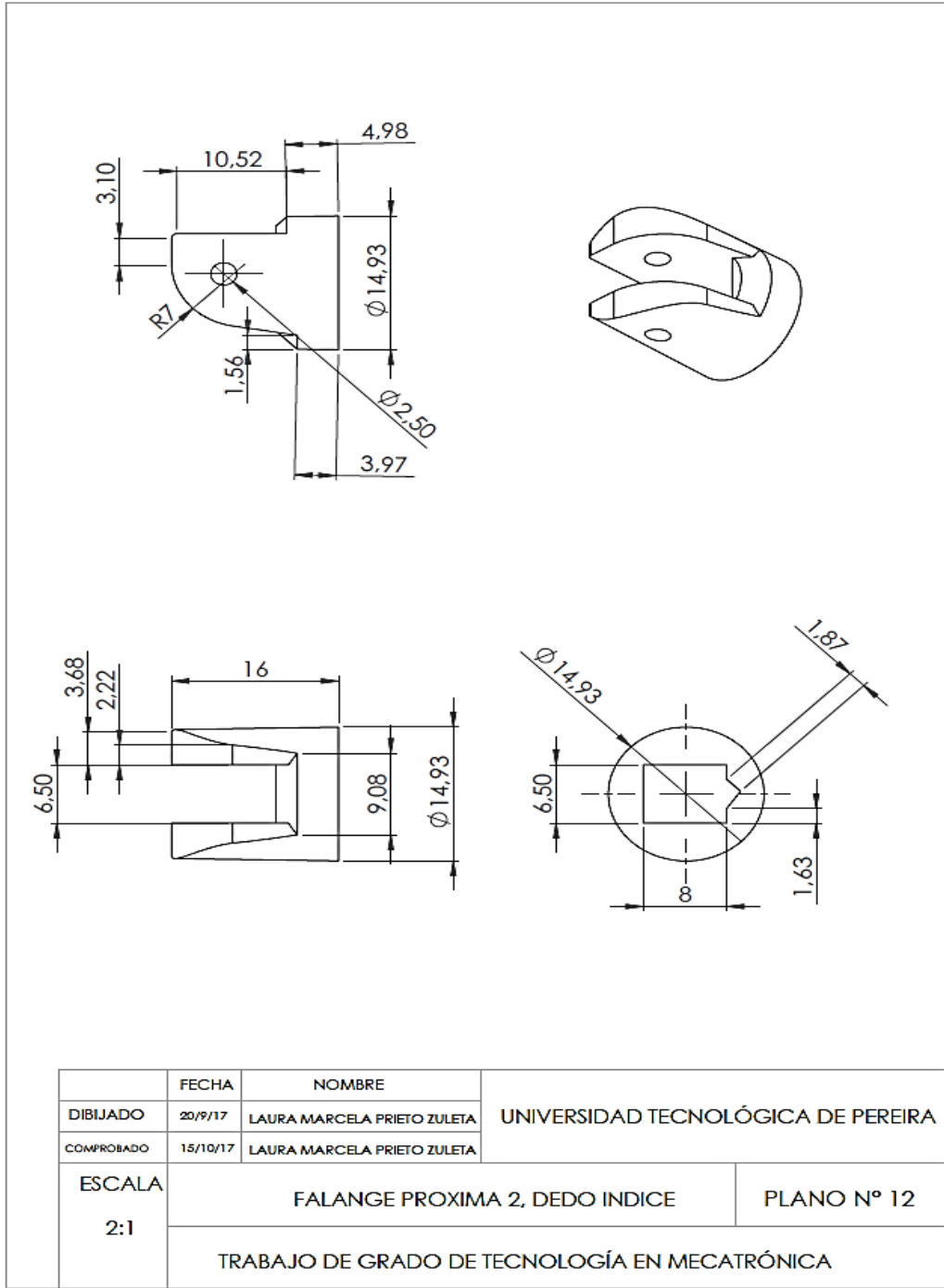


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE METARCARPIANO 2, DEDO INCICE		PLANO N° 10
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

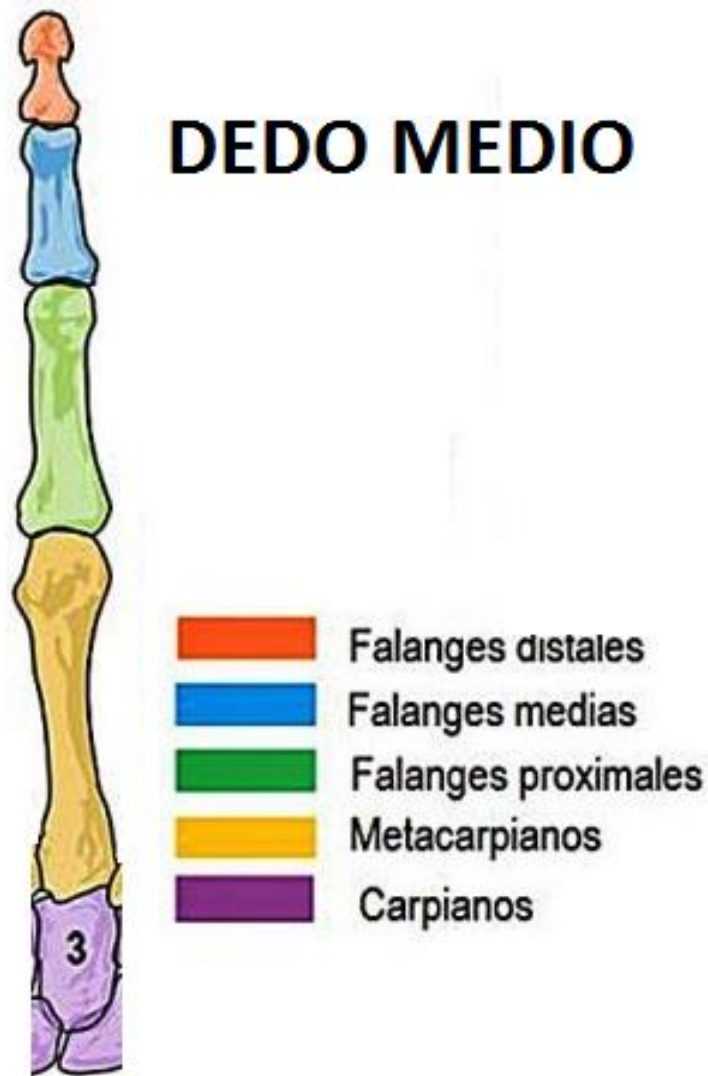




	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE PROXIMAL 1, DEDO INDICE		PLANO N° 11
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

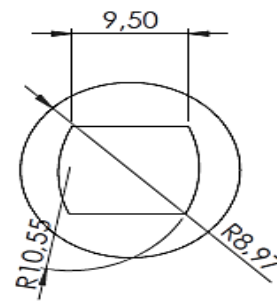
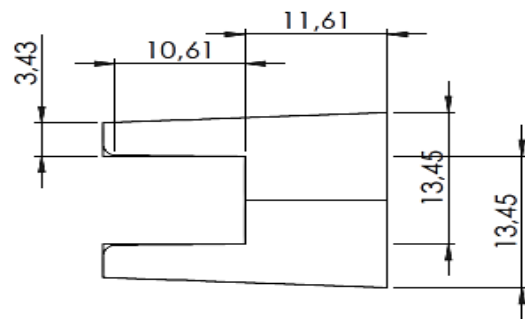
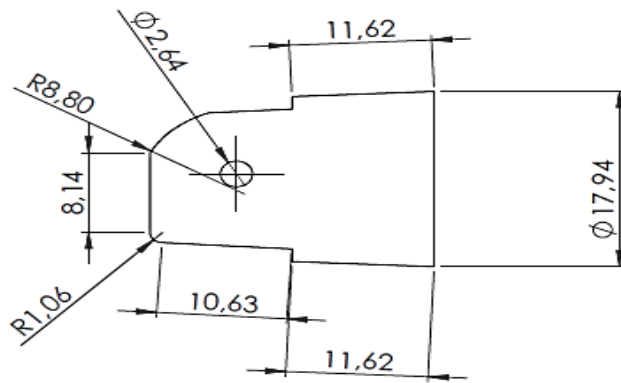


Los siguientes planos que se presentaran serán las partes del dedo medio nombrada analogamente a los huesos de una mano humana, como falange distal, proximal, metacarpiano y media.

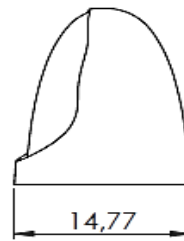
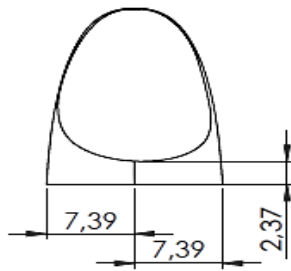
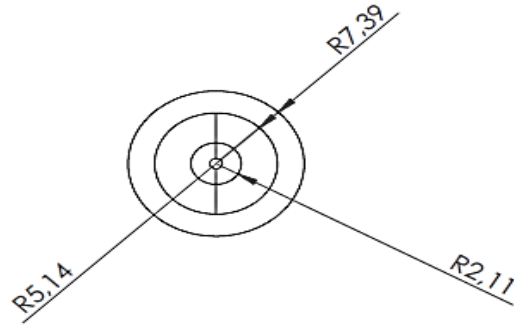
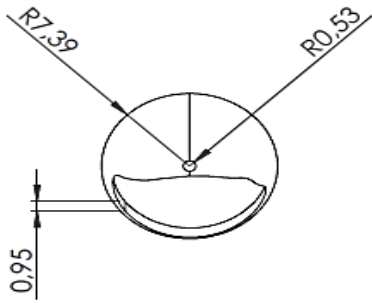


*Imagen 39: Dedo medio.*

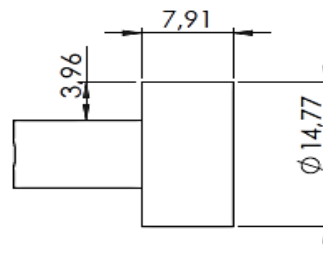
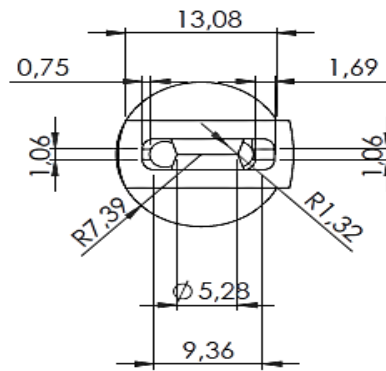
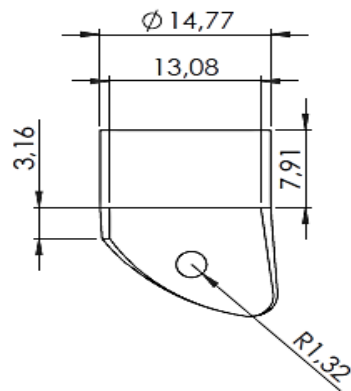
Cortesía de [<https://fisiostar.com/anatomia/articulaciones-de-la-mano>]



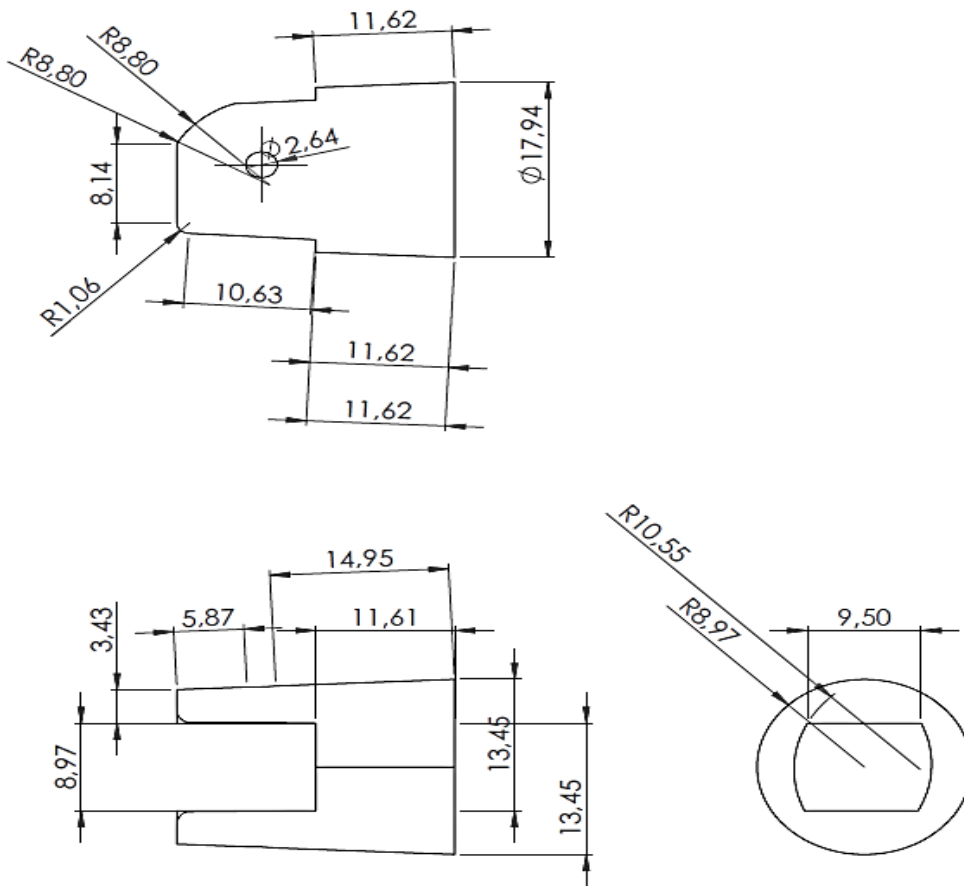
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE METACARPIANA 2, DEDO MEDIO		PLANO N° 13
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRONICA		



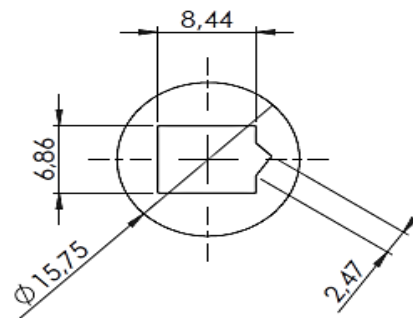
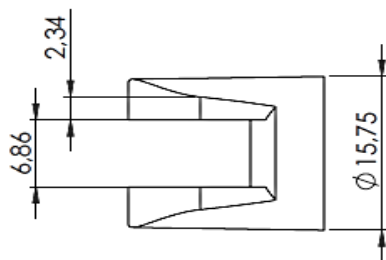
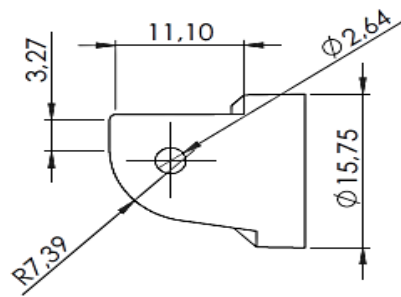
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE DISTAL, DEDO MEDIO		PLANO N° 14
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE MEDIO, DEDO MEDIO		PLANO N° 15
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

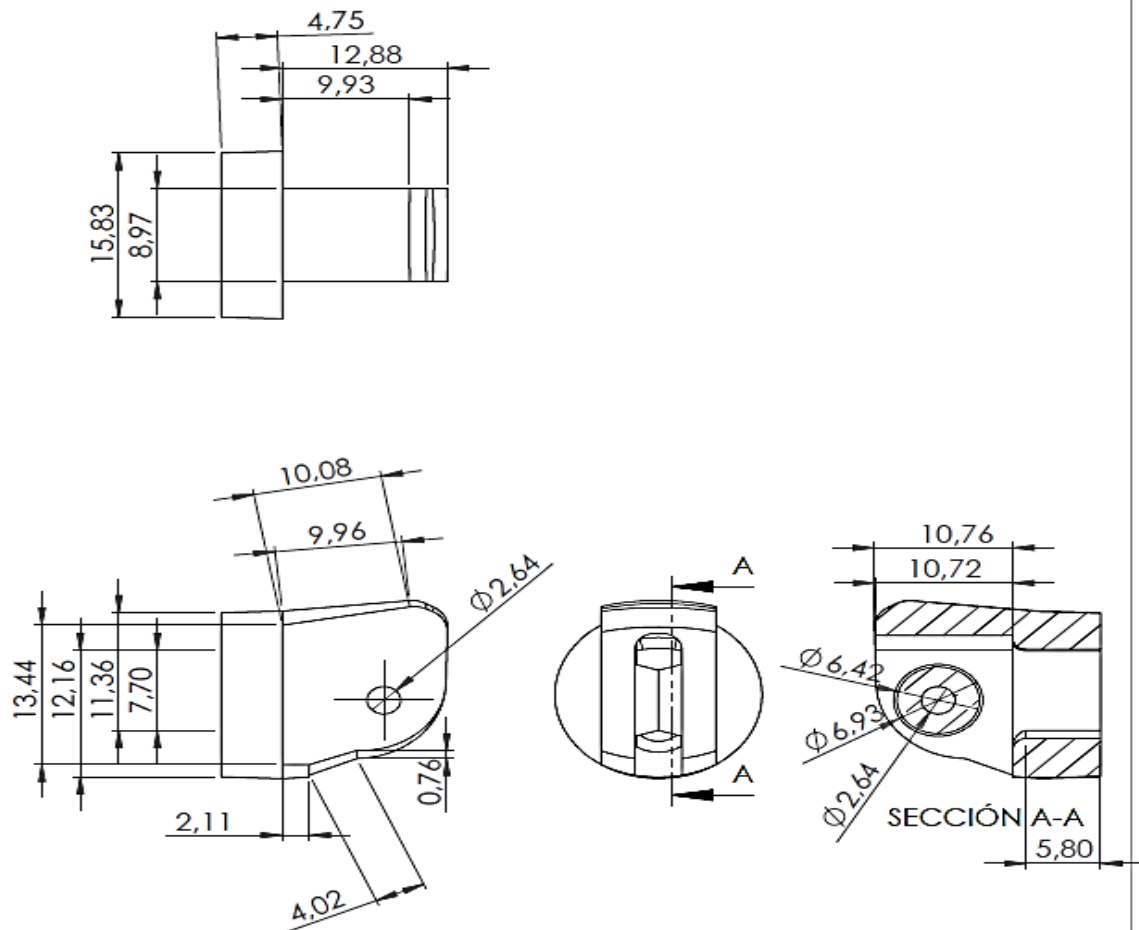


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE METACARPIANA 1, DEDO MEDIO		PLANO N° 16
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



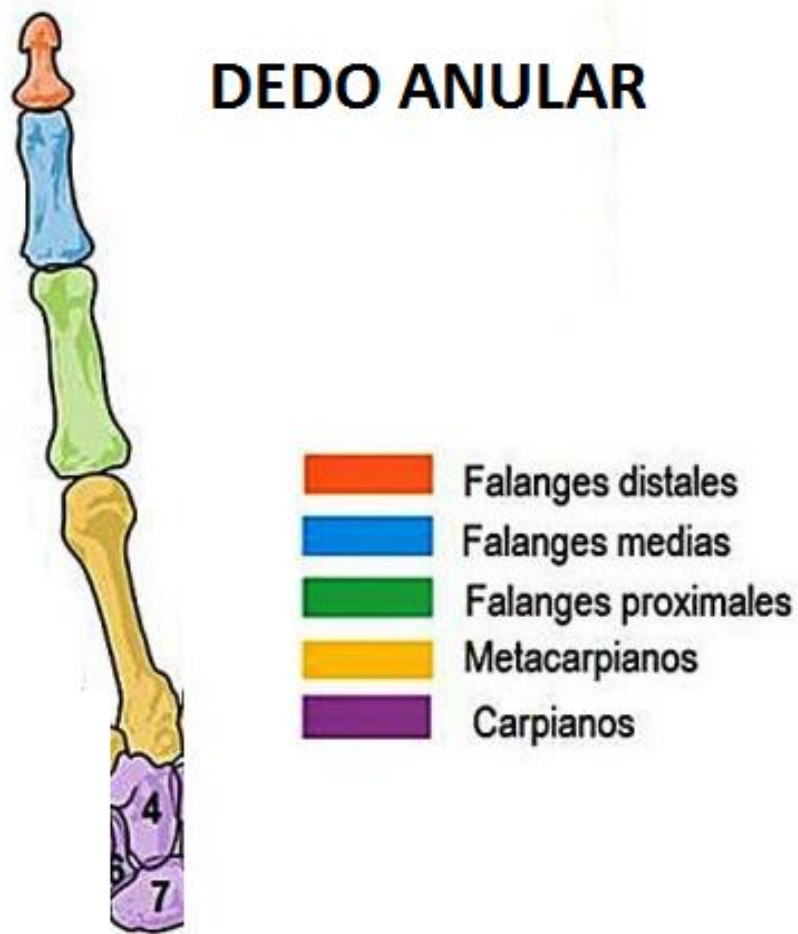
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE PROXIMAL 1, DEDO MEDIO		PLANO N° 17
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		





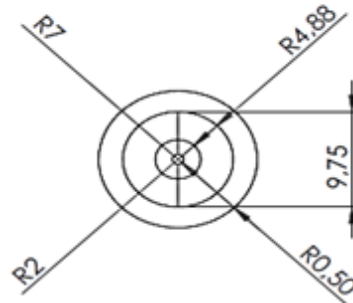
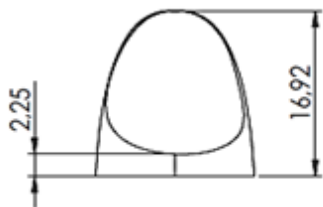
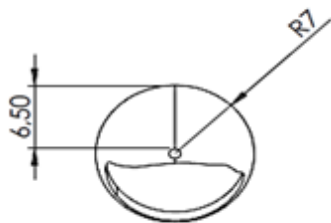
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE PROXIMAL 2, DEDO MEDIO		PLANO N° 18
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

Los siguientes planos que se presentaran serán las partes del dedo anular nombrada analogamente a los huesos de una mano humana, como falange distal, proximal, metacarpiano y media.

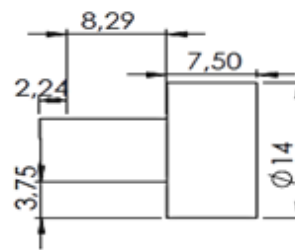
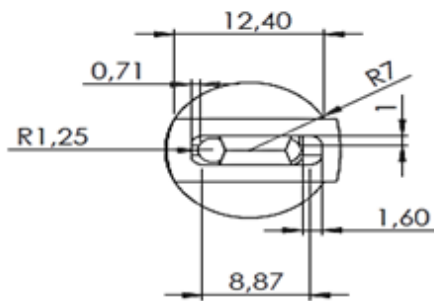
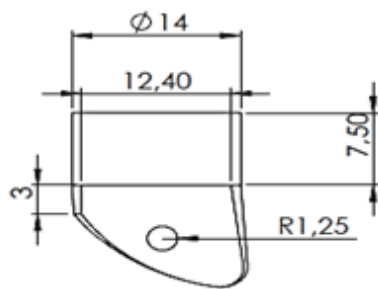


*Imagen 40: Dedo Anular.*

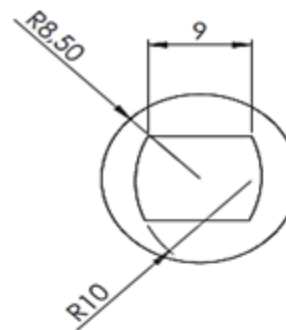
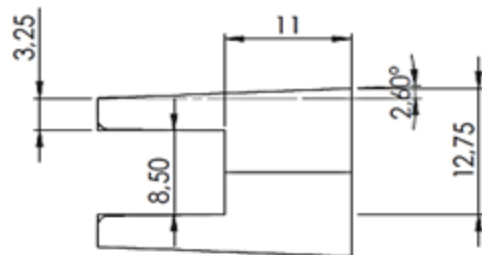
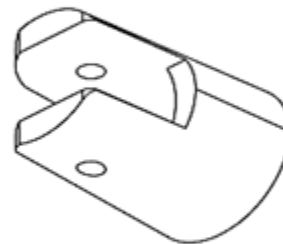
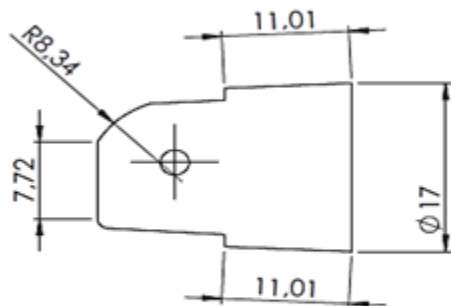
*Cortesía de [<https://fisiostar.com/anatomia/articulaciones-de-la-mano>]*



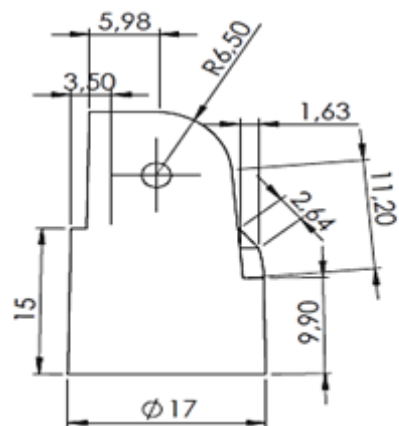
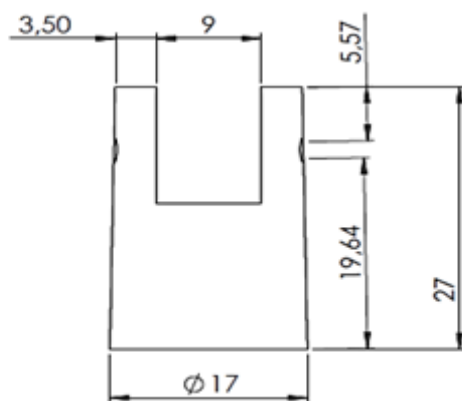
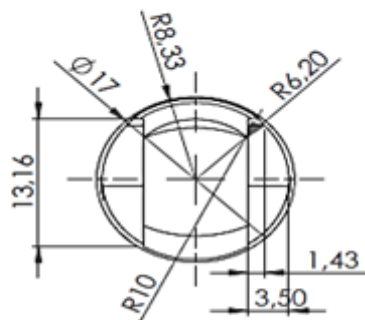
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBUJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE DISTAL, DEDO ANULAR		PLANO N° 19
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MEATRÓNICA		



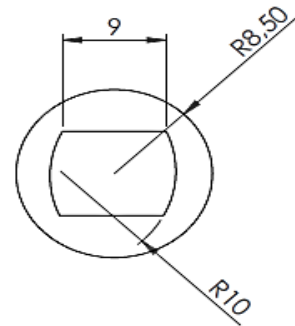
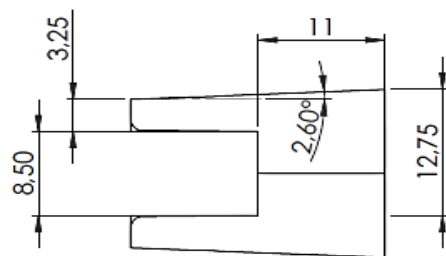
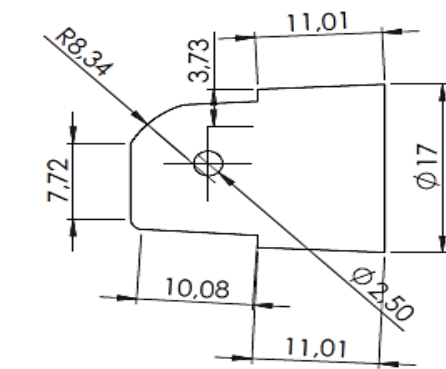
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE MEDIA, DEDO ANULAR		PLANO N° 20
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



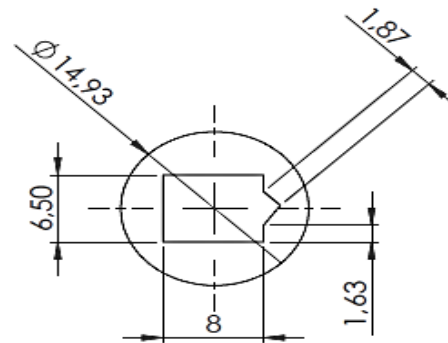
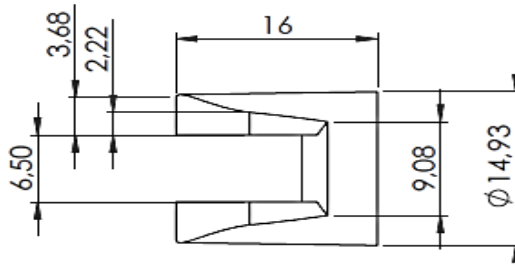
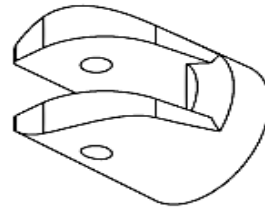
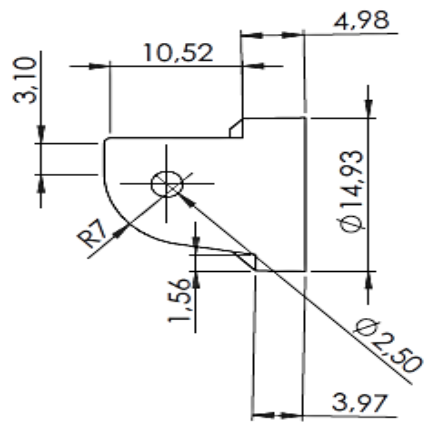
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBUJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE METARCARPIANO 1, DEDO ANULAR		PLANO N° 21
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBUJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE METARCARPIANO 2, DEDO ANULAR		PLANO N° 22
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE PROXIMAL 1, DEDO ANULAR		PLANO N° 23
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

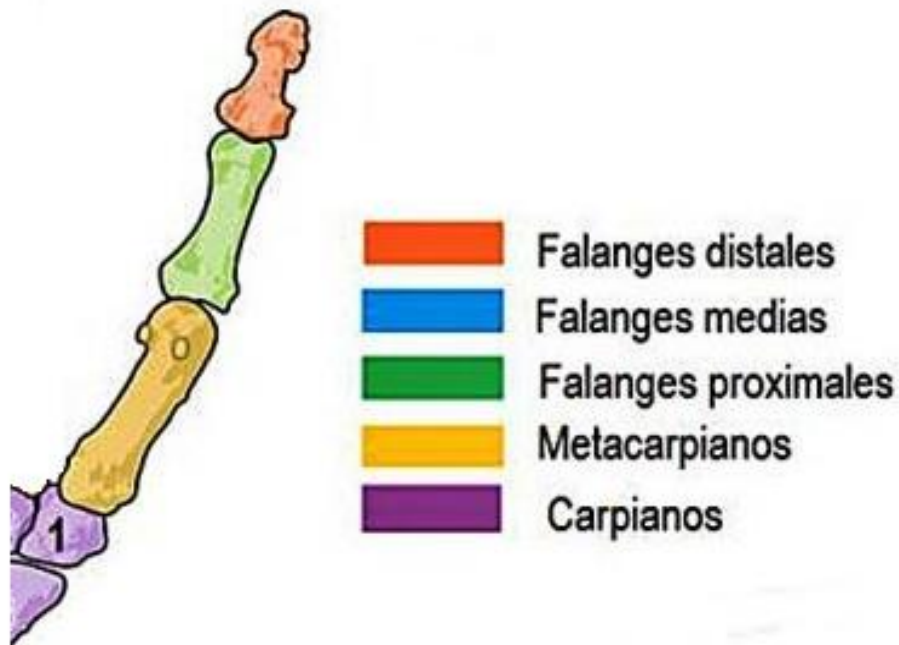


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE PROXIMA 2. DEDO ANULAR		PLANO N° 24
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



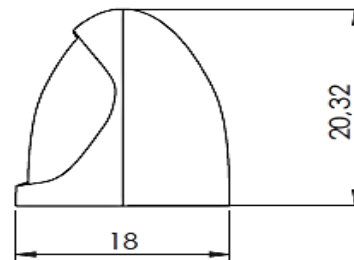
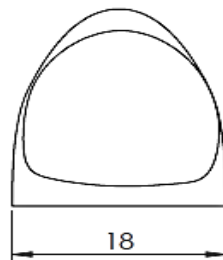
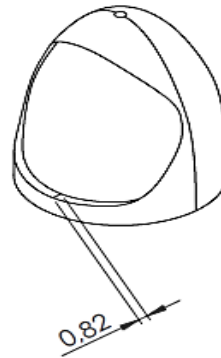
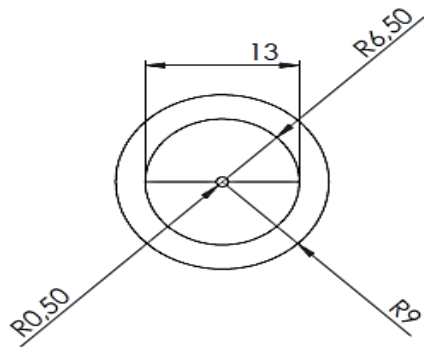
Los siguientes planos que se presentaran serán las partes del dedo pulgar nombrada analogamente a los huesos de una mano humana, como falange distal, proximal, metacarpiano y media.

## DEDO PULGAR

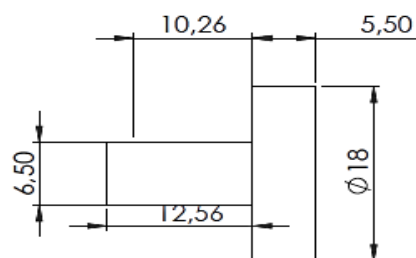
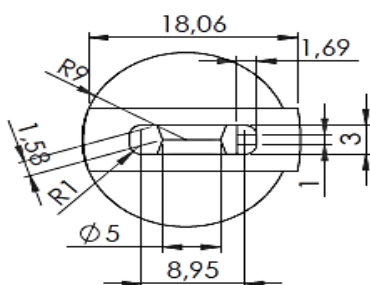
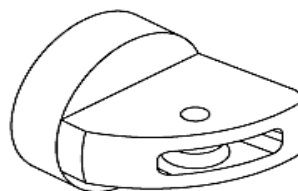
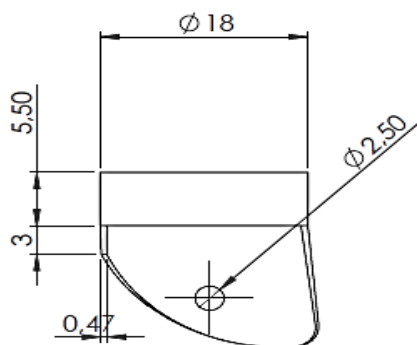


*Imagen 41: Dedo Pulgar.*

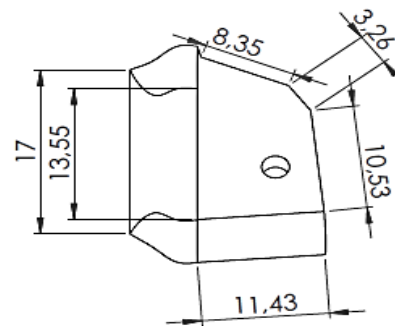
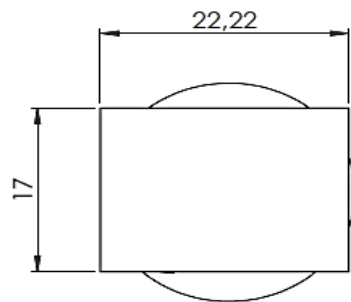
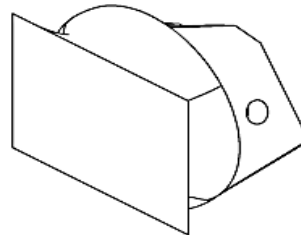
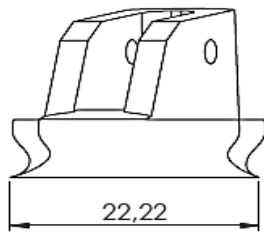
Se obtuvo de [<https://fisiostar.com/anatomia/articulaciones-de-la-mano>]



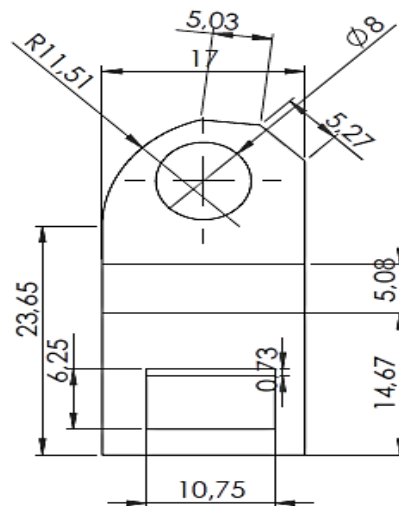
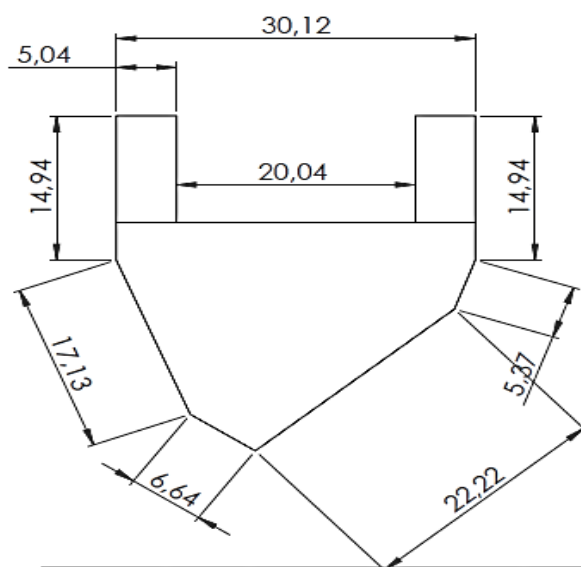
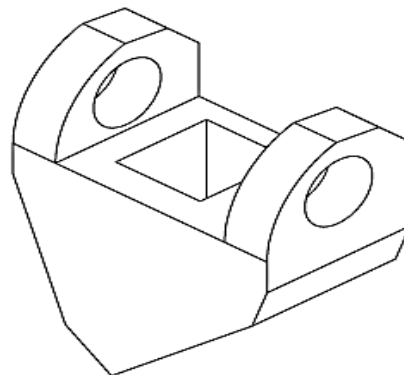
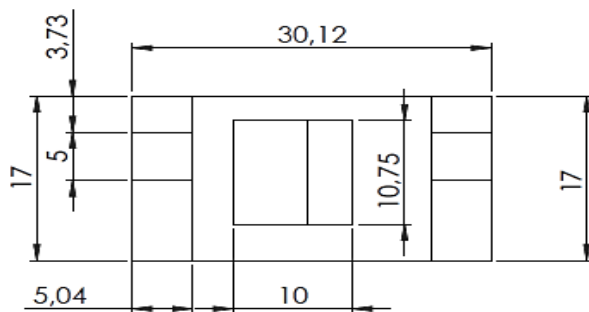
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE DISTAL 2, DEDO PULGAR		PLANO N° 25
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MACATRÓNICA		



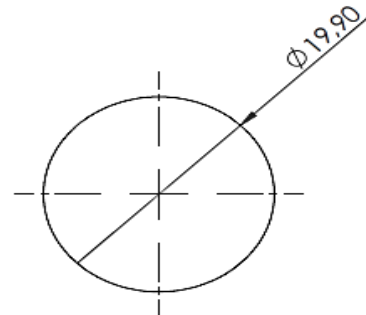
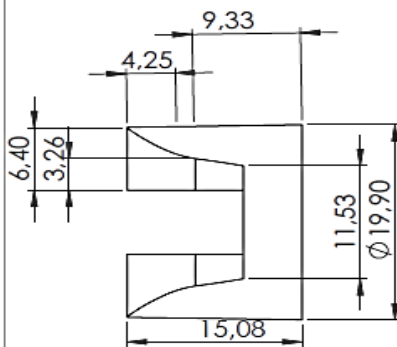
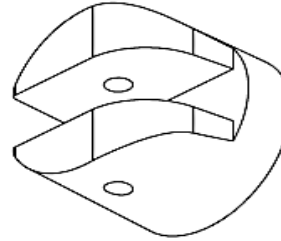
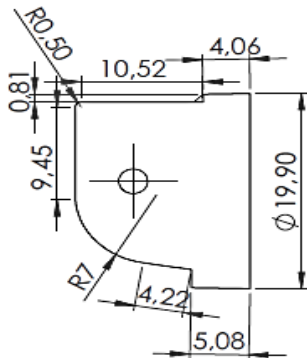
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE DISTAL I, DEDO PULGAR		PLANO N° 26
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



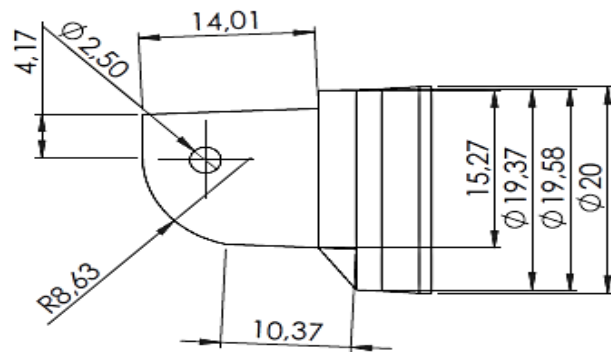
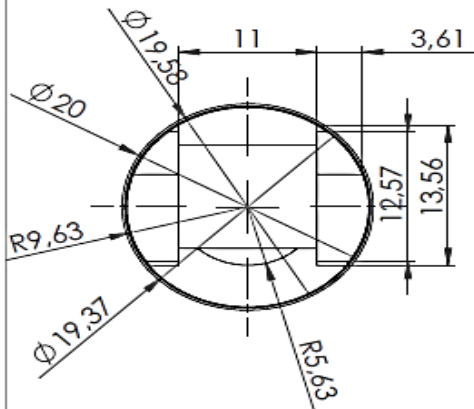
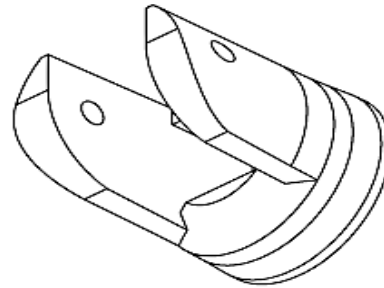
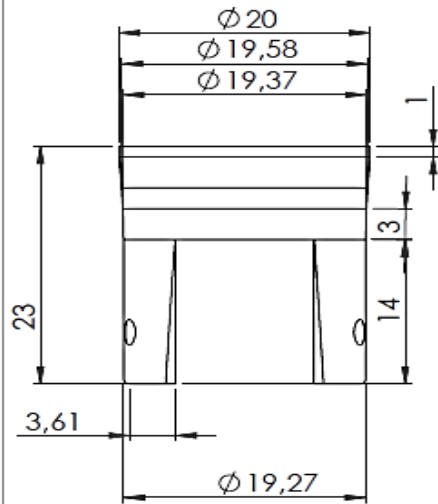
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE METACARPIANO 1, DEDO PULGAR		PLANO N° 27
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	FALANGE METACARPIANO 2, DEDO PULGAR		PLANO N° 28
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MACTRÓNICA		

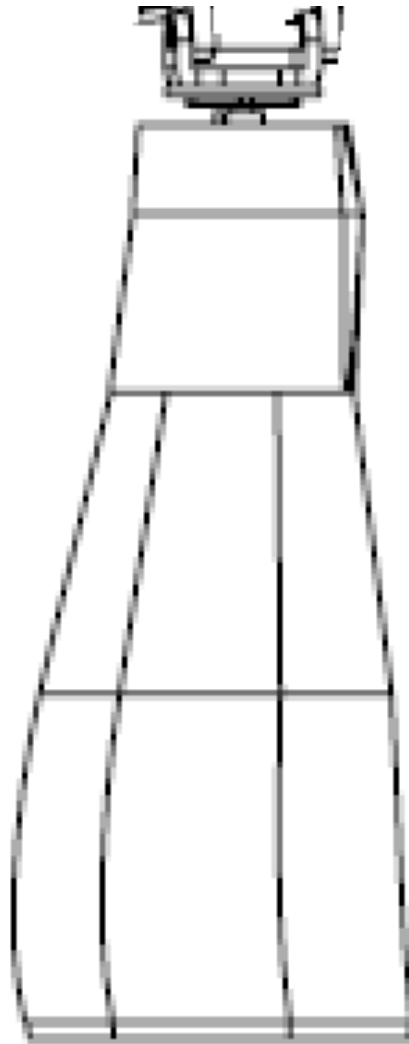


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE PROXIMAL 1, DEDO PULGAR		PLANO N° 29
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



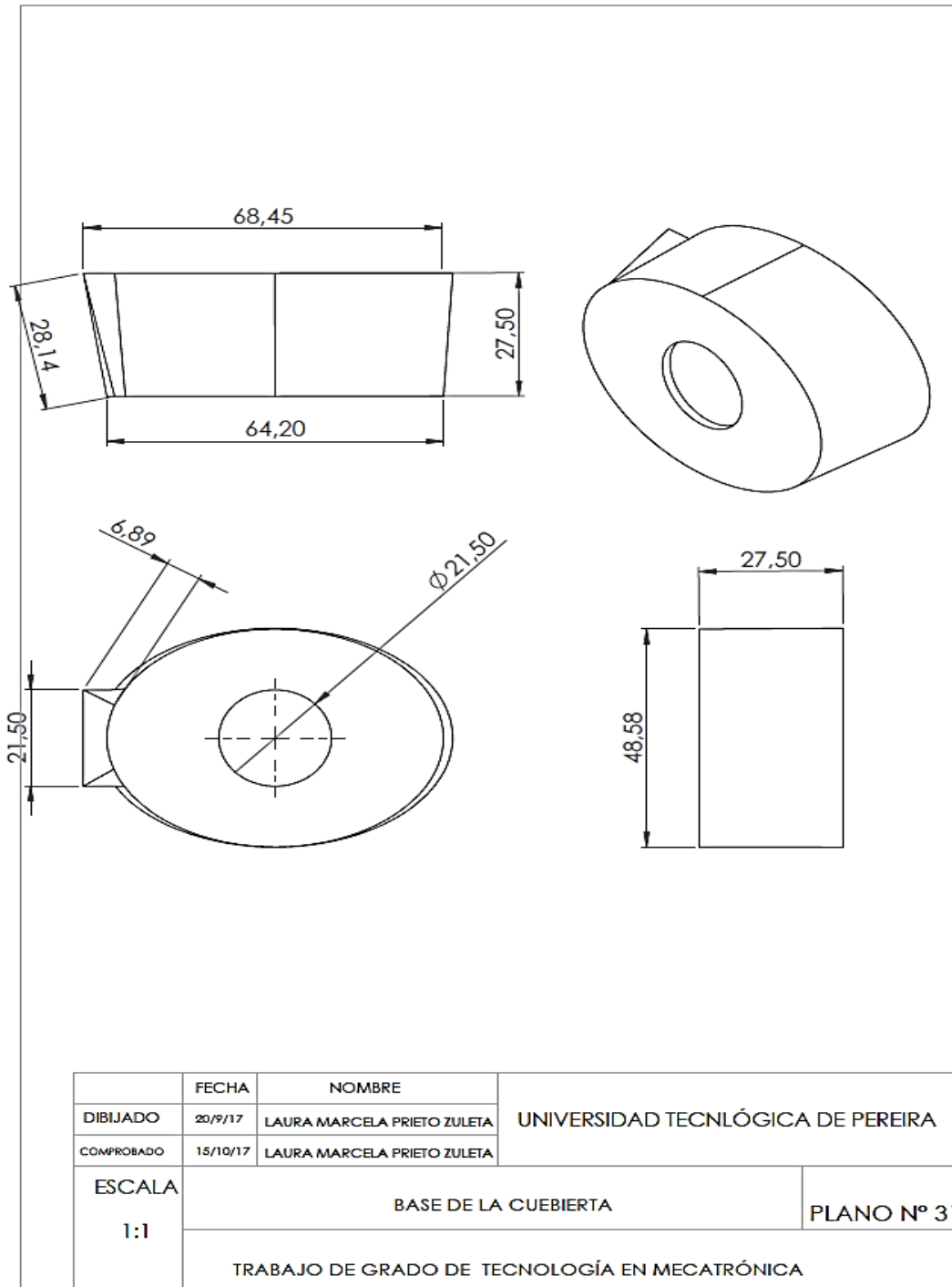
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	FALANGE PROXIMAL 2, DEDO PULGAR		PLANO N° 30
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MACATRÓNICA		

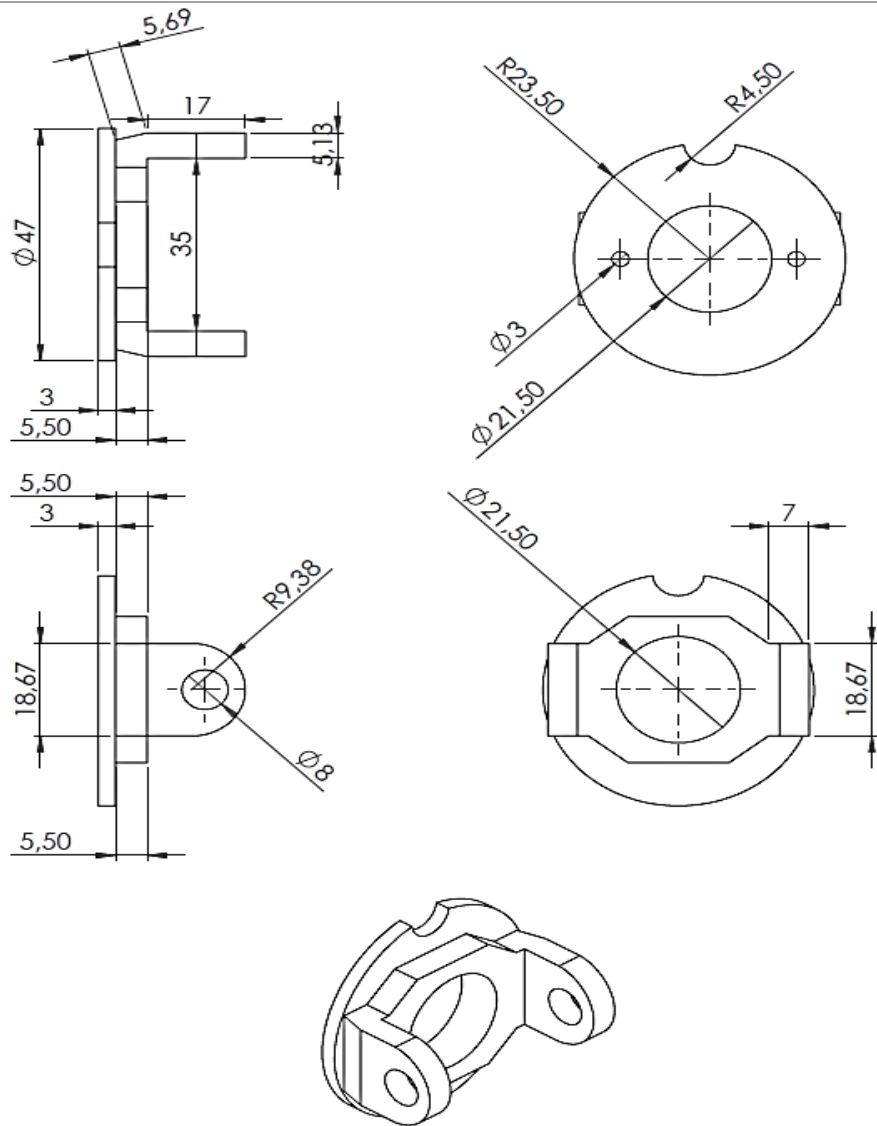
Los planos a continuacion es del antebrazo donde la persona ubicara la parte del antebrazo que le quedo de la amputacion



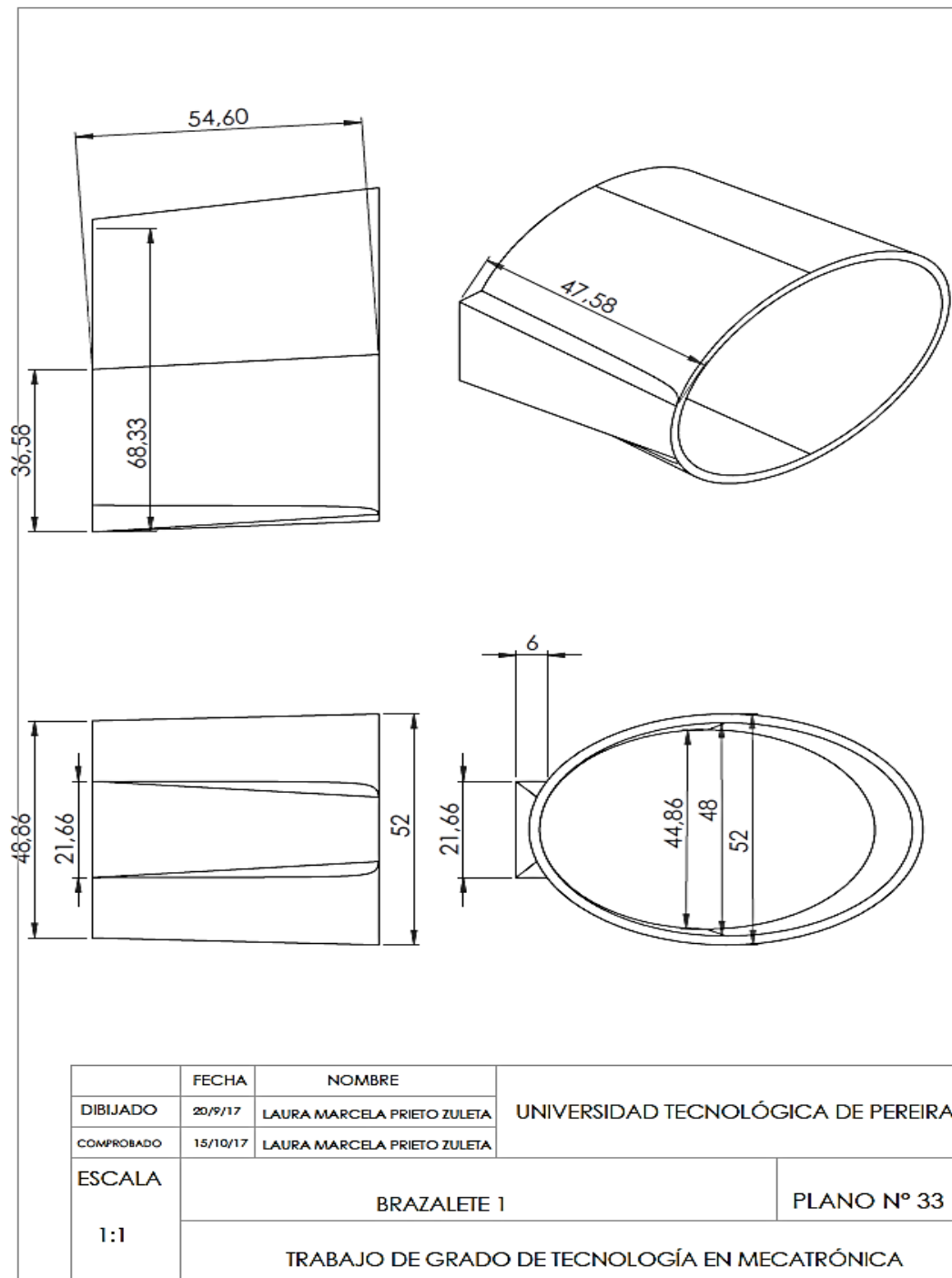
*Imagen 42: Antebrazo.*

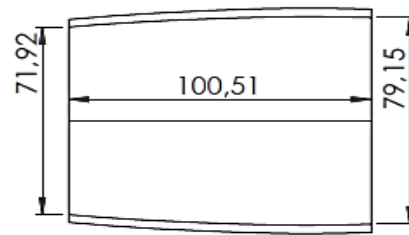
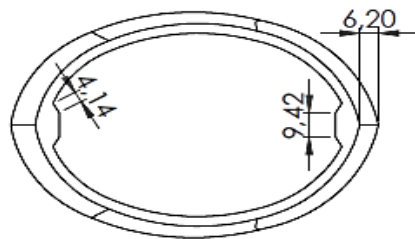
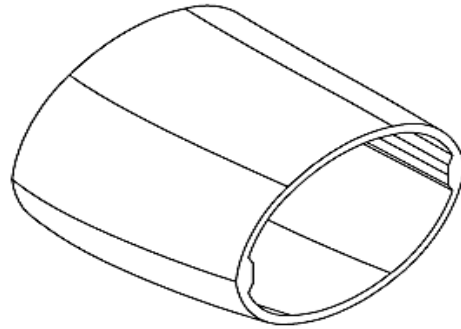
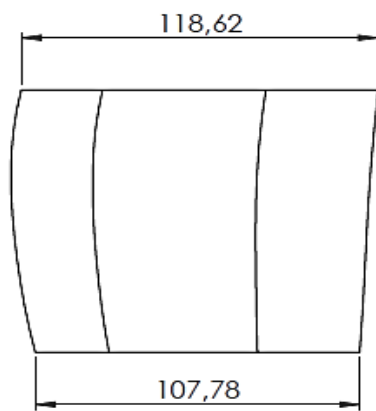






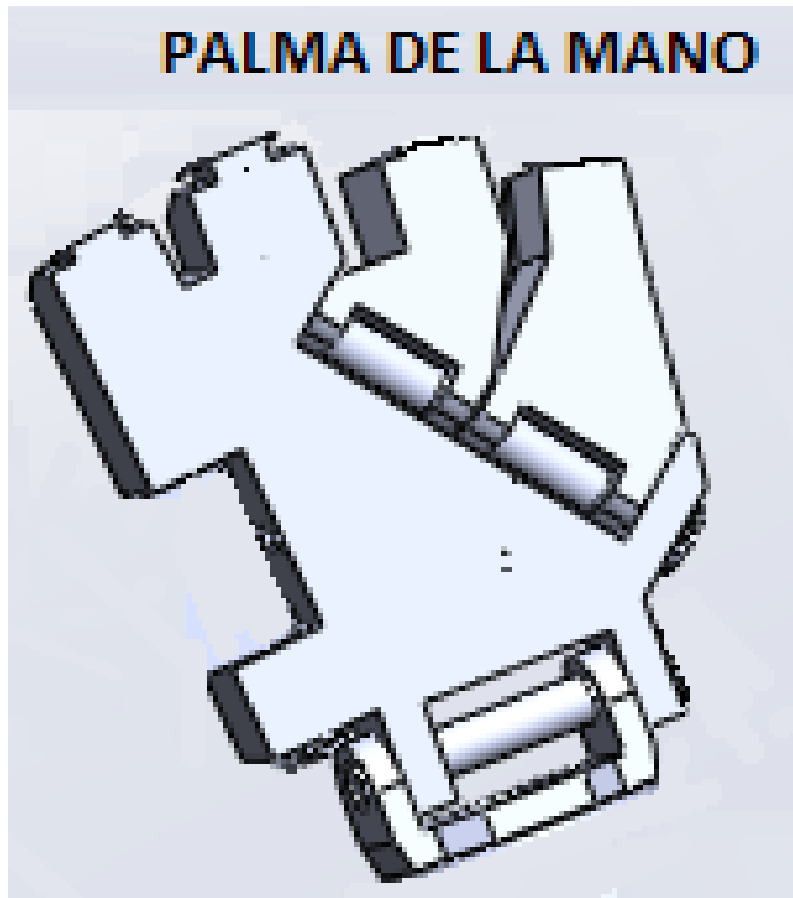
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	BASE DE LA MANO		PLANO N° 32
1:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



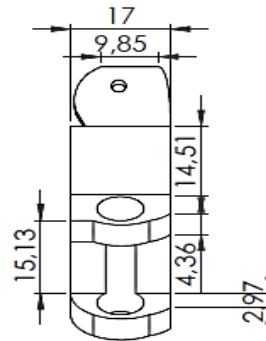
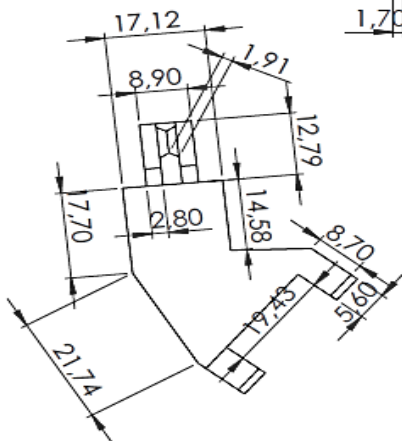
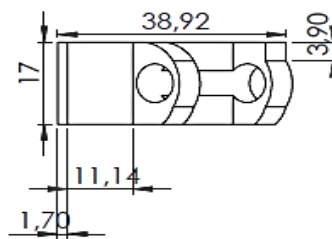
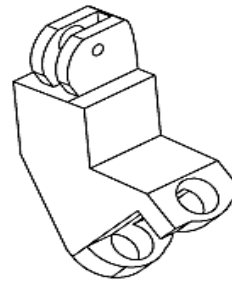
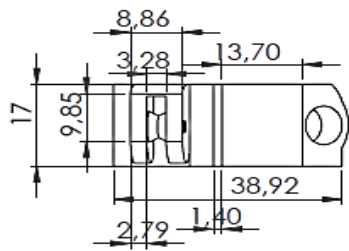


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 1:2	BRAZALETE 2		PLANO N° 34
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATÓNICA		

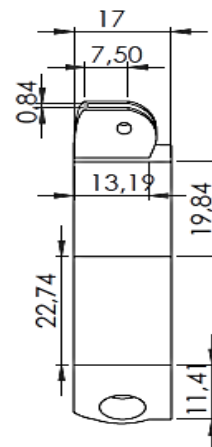
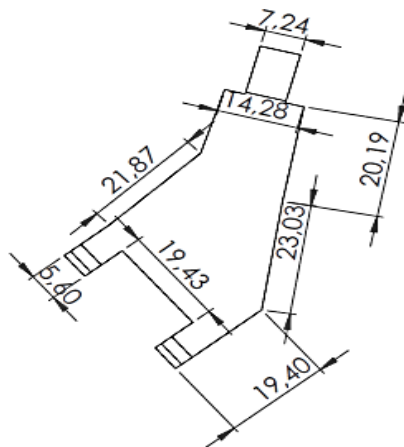
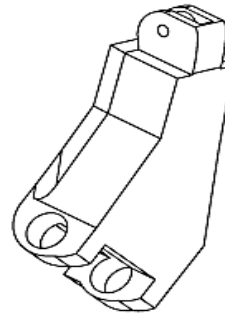
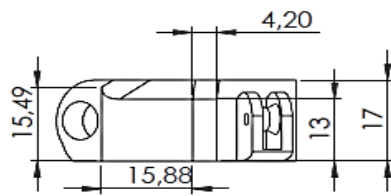
Los panos que siguen son para el ensamblaje de la palma de la mano donde se compone de 3 partes



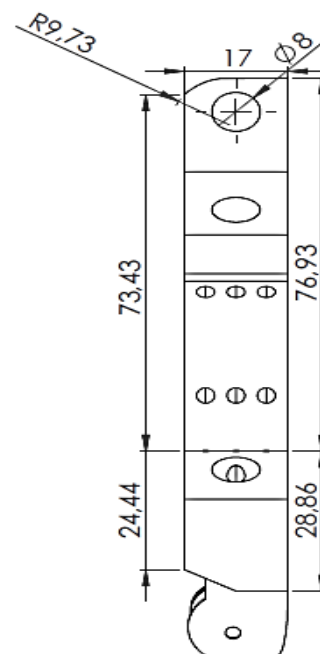
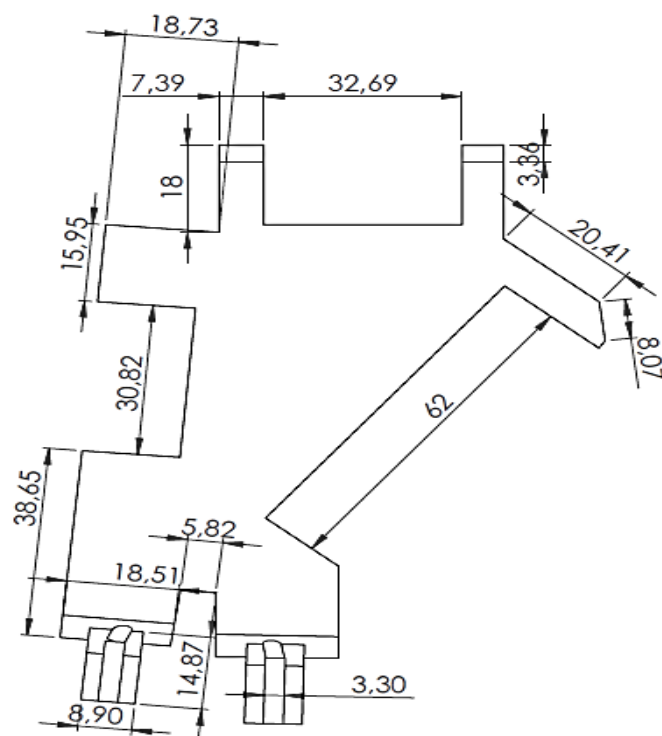
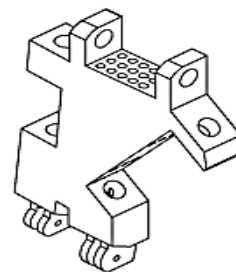
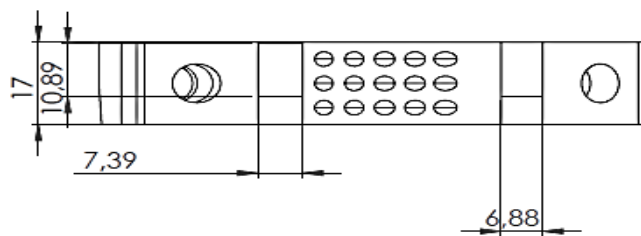
*Imagen 43: Palma de la mano.*



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	PALMA DE LA MANO PEQUEÑA		PLANO N° 36
1:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

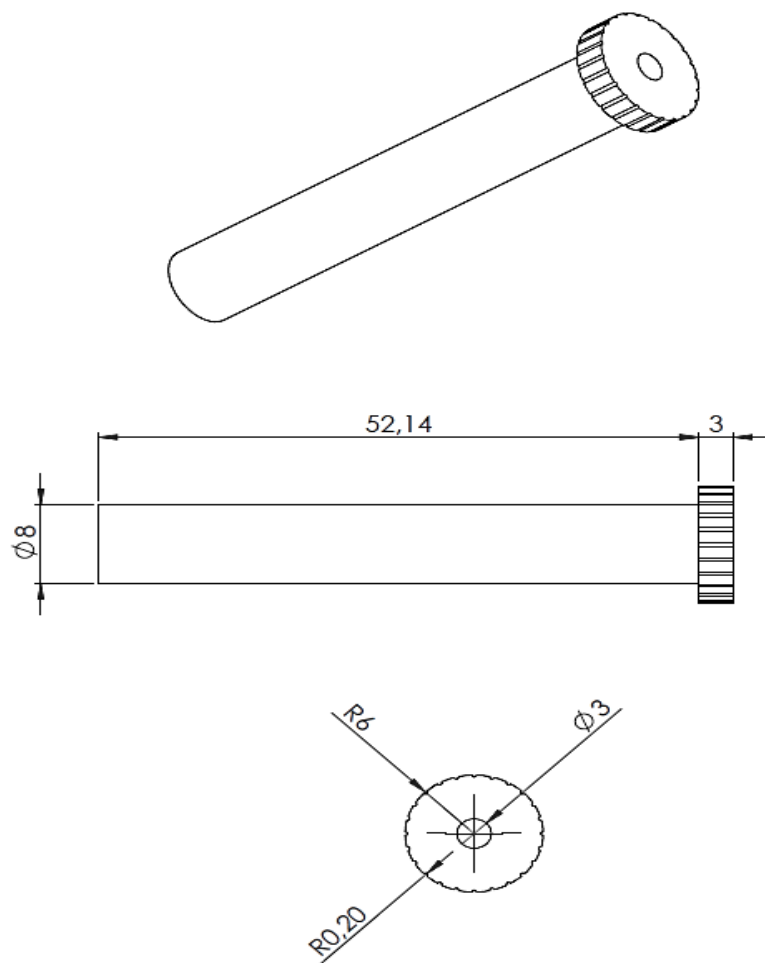


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 1:1	PALMA DE LA MANO PEQUEÑA 2		PLANO N° 37
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

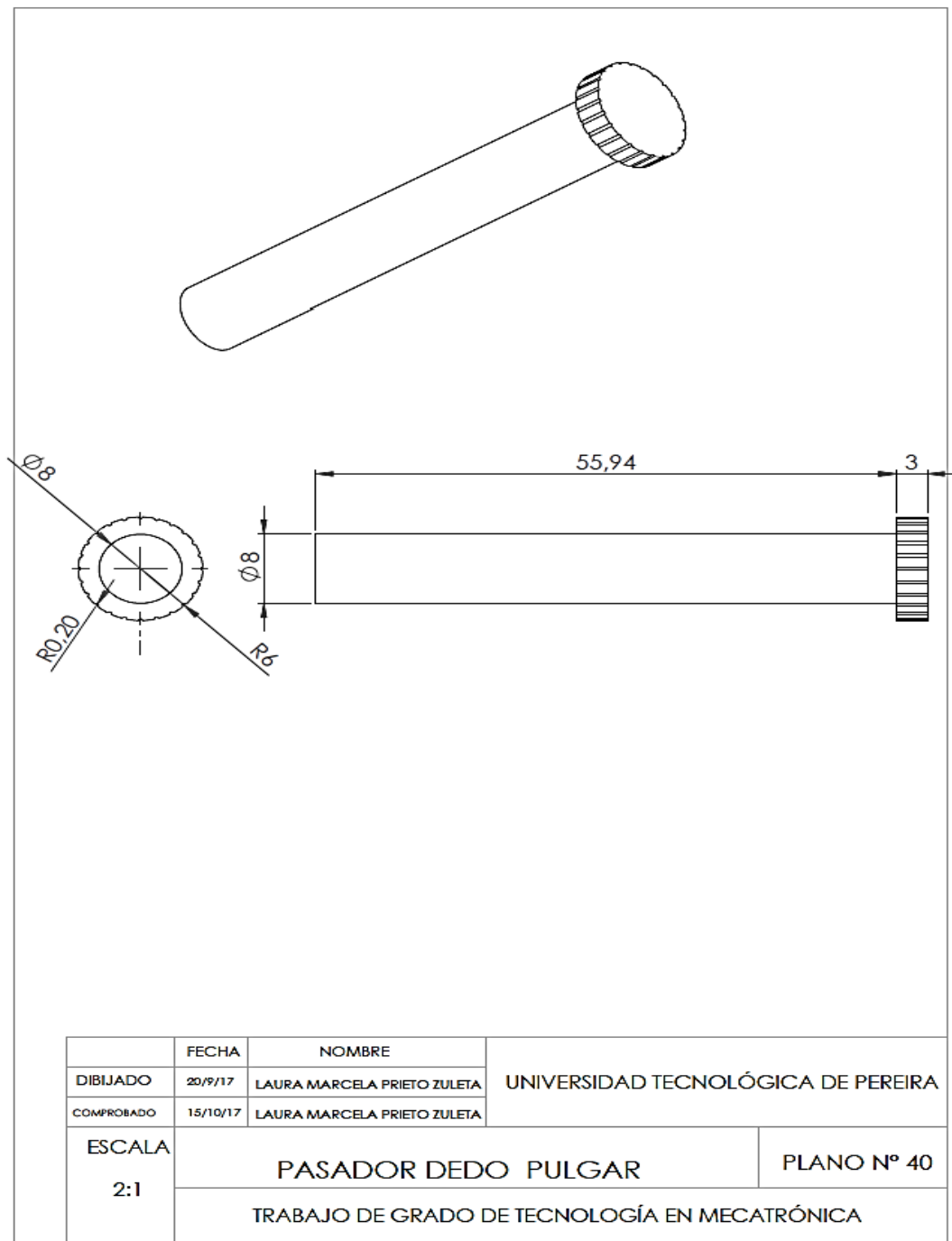


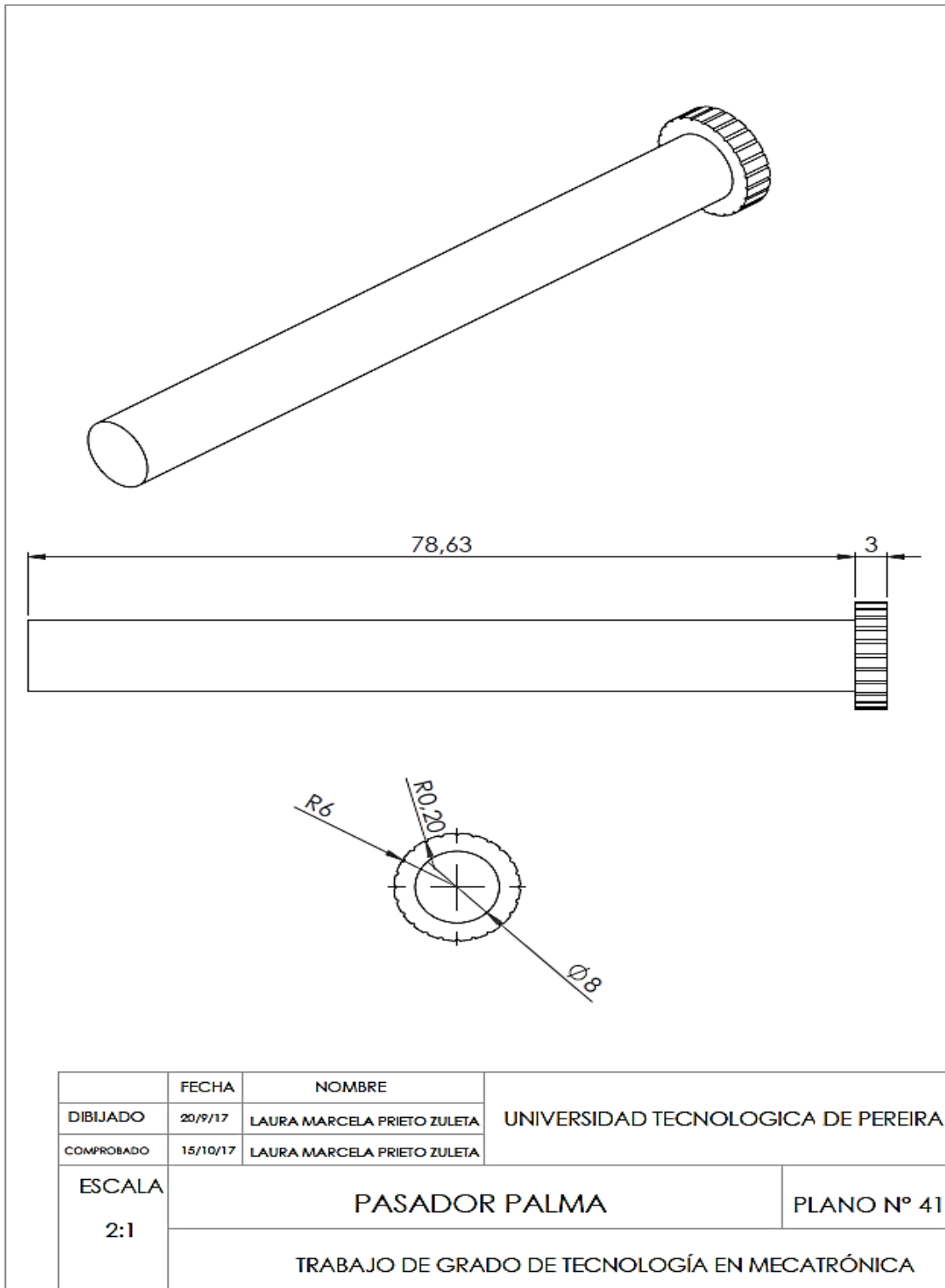
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	PALMA DE LA MANO		PLANO N° 38
1:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA DE MECATRÓNICA		





	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 2:1	PASADOR CUBIERTA		PLANO N° 39
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

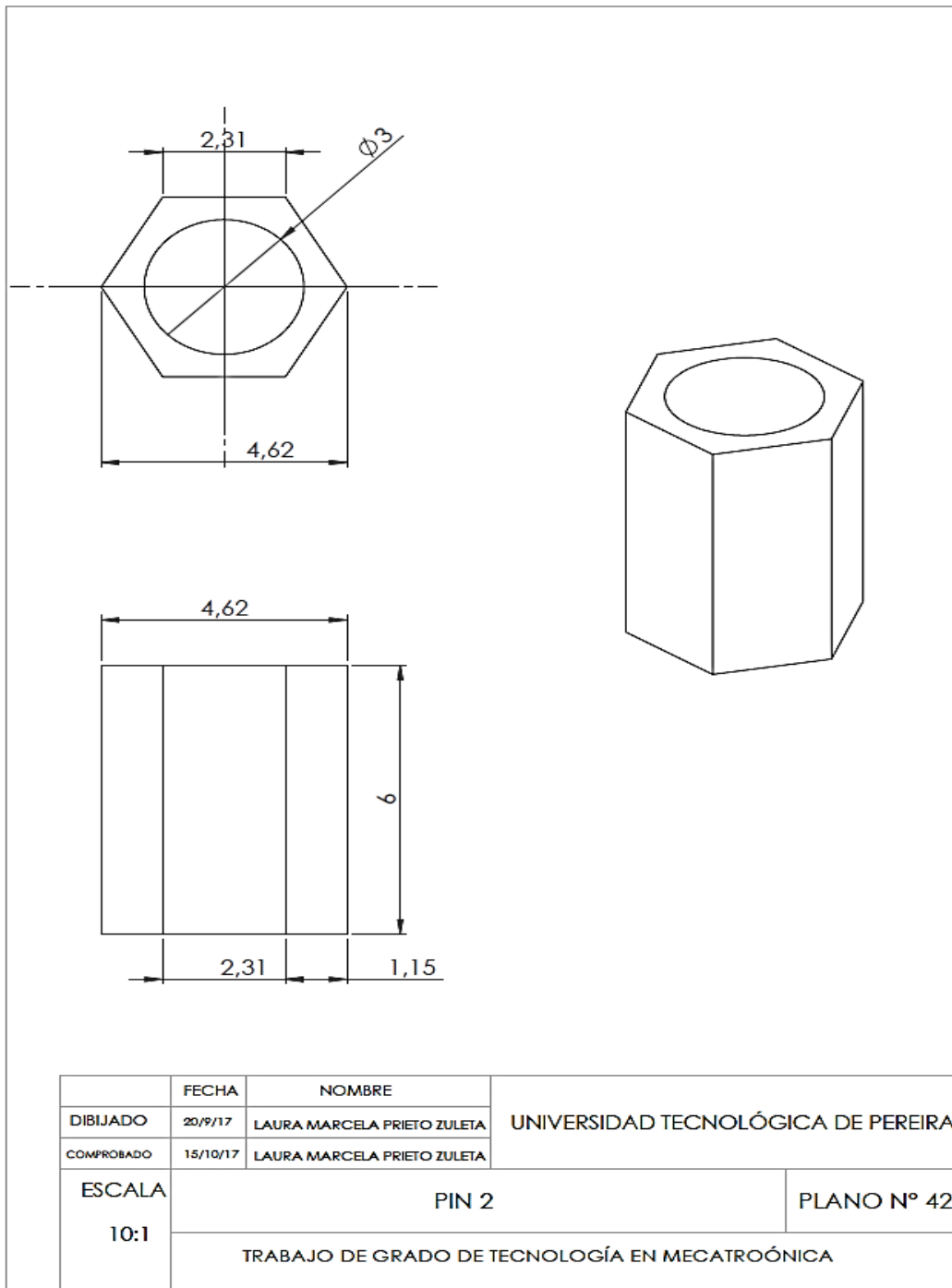


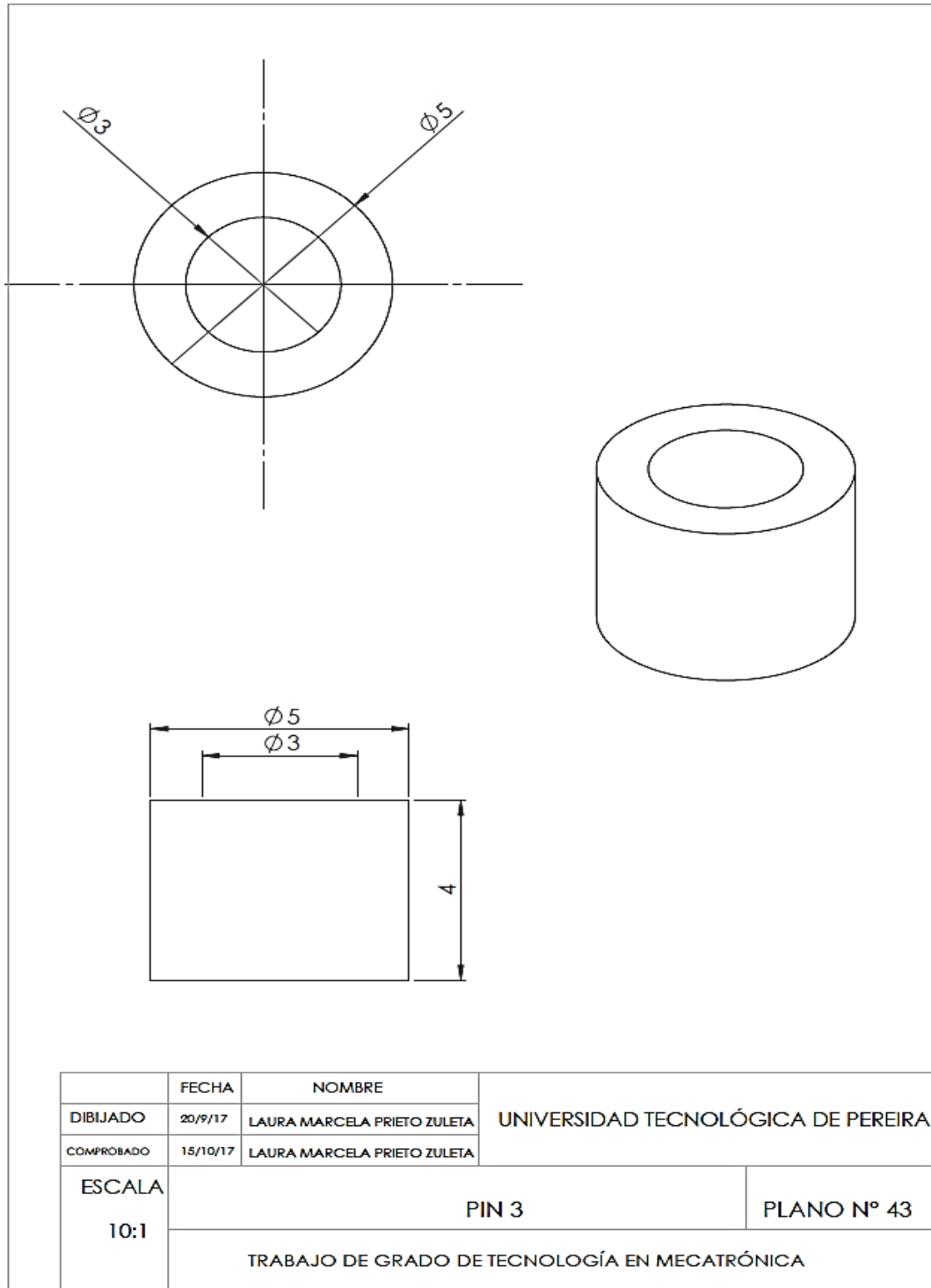


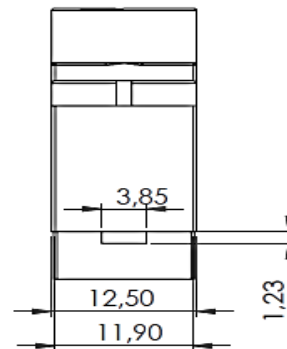
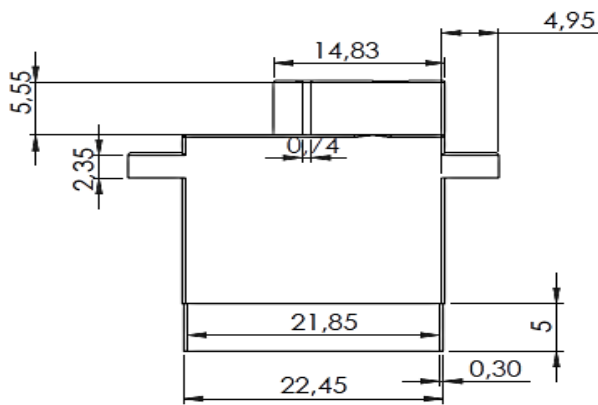
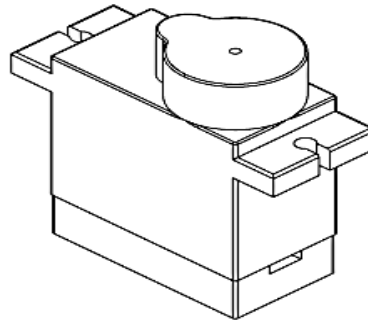
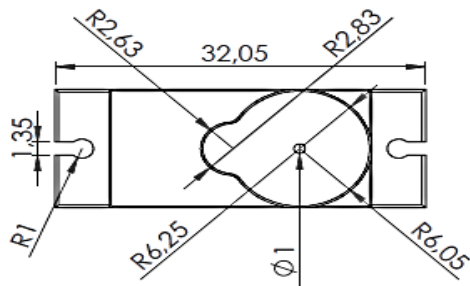
Los elementos utilizados en el servo MG90s como el pin, el gear, shaft se mostrarán en los siguientes planos donde como se muestra del resultado final se podrá observar en la siguiente imagen.



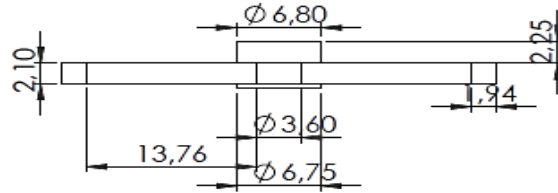
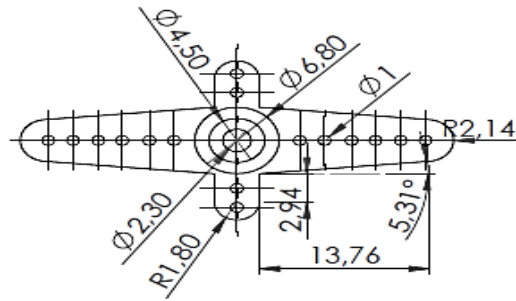
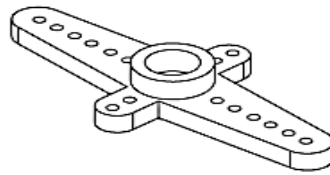
*Imagen 44: Servomotor MG90s*





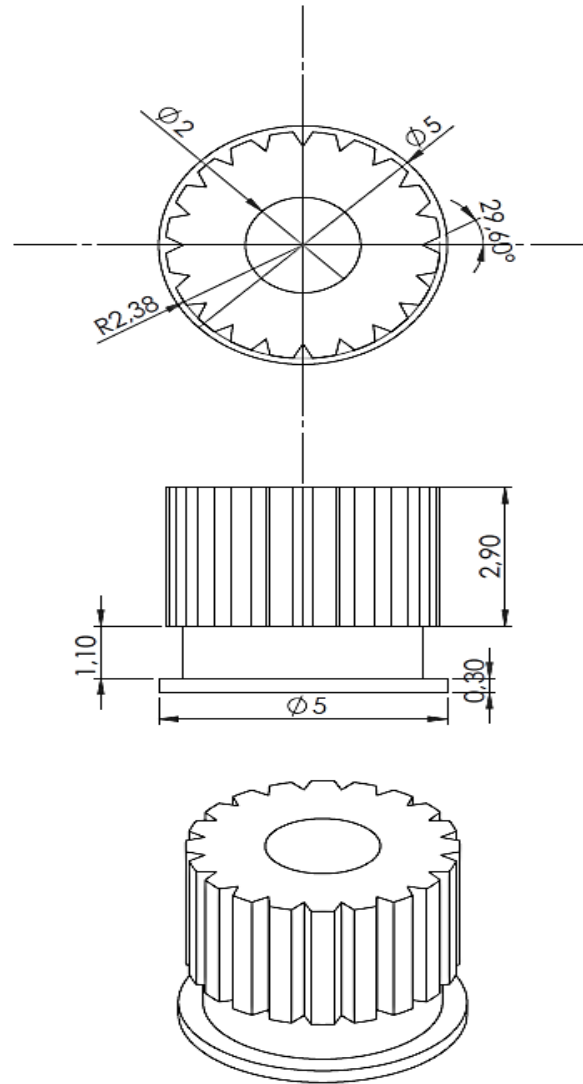


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	CUERPO DEL SERVO MG90S		PLANO N° 44
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



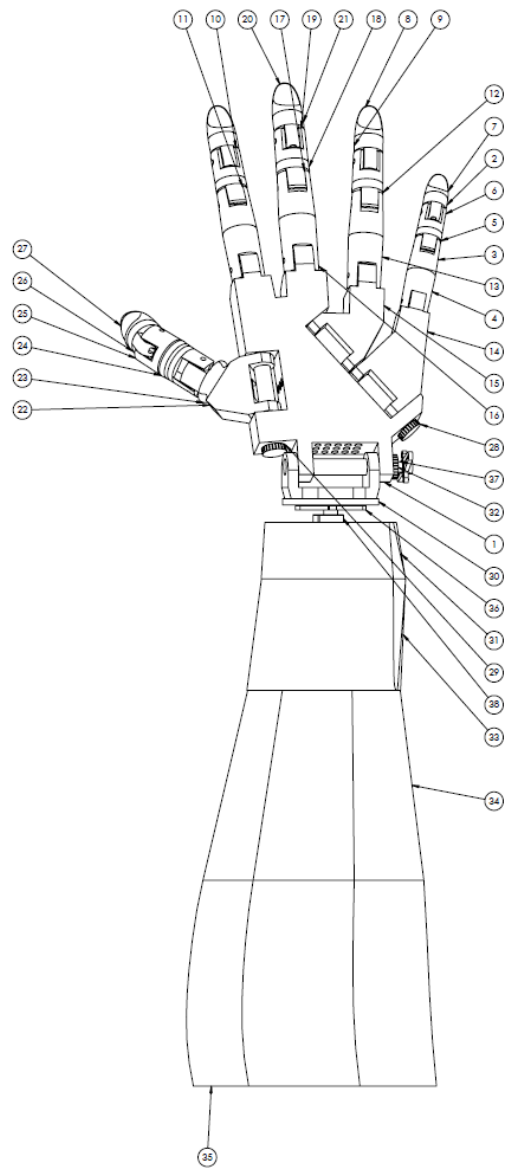
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA	GEAR SERVO MG90S		PLANO N° 45
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



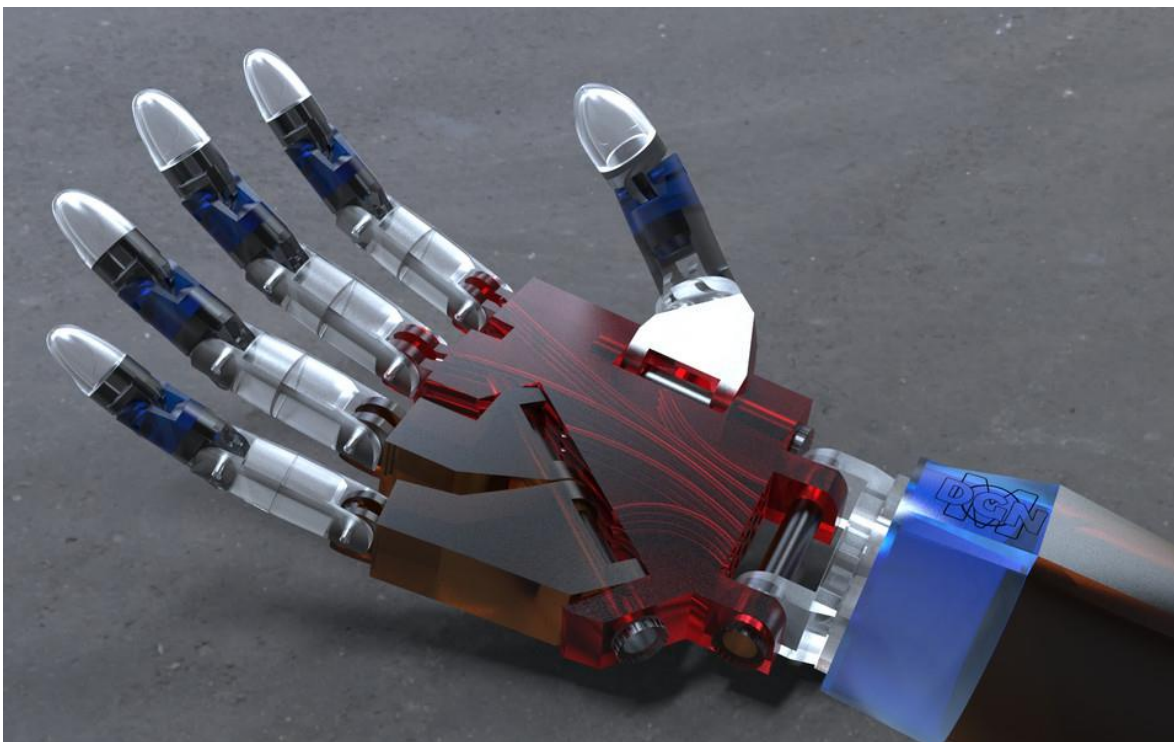


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBIJADO	20/9/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
COMPROBADO	15/10/17	LAURA MARCELA PRIETO ZULETA	
ESCALA 10:1	SHAFT, SERVO MG90S		PLANO N° 46
	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		

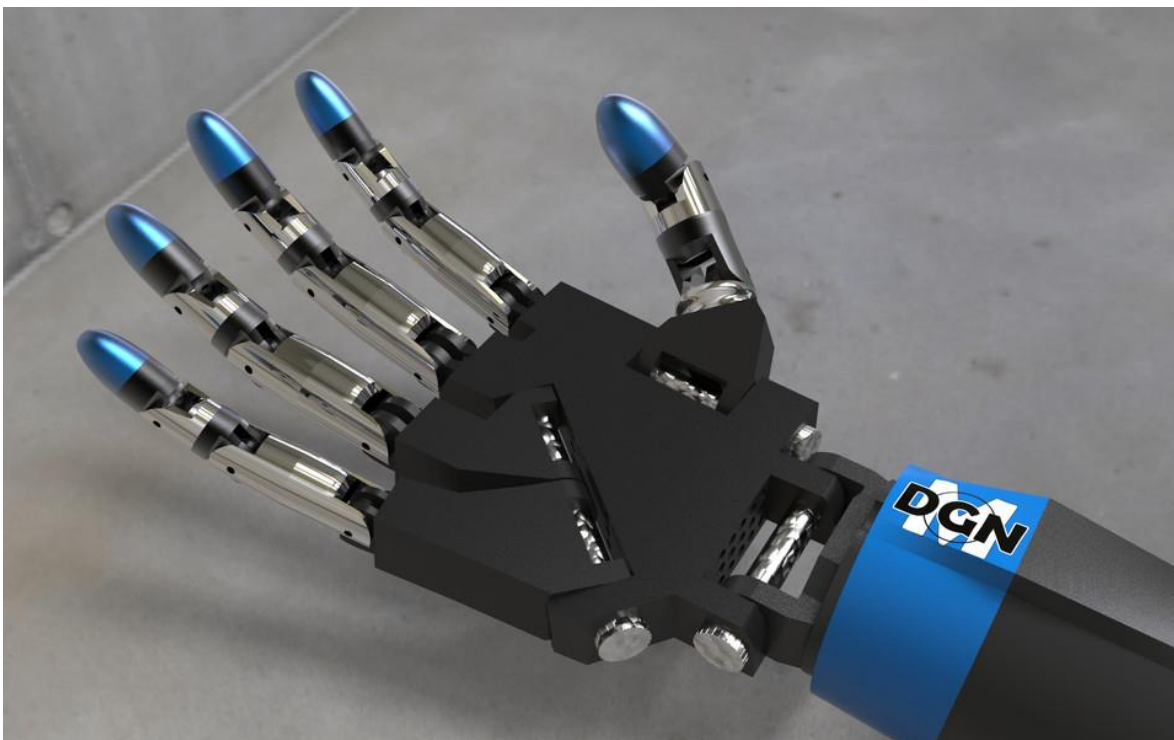
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	PALMA DE LA MANO	1
2	FALANGE MEDIA DEDO MENIQUE	1
3	FALANGE METACARPIANO 1 DEDO MENIQUE	1
4	FALANGE METACARPIANO 2 DEDO MENIQUE	1
5	FALANGE PROXIMAL 2 DEDO MENIQUE	1
6	FALANGE PROXIMAL 1 DEDO MENIQUE	1
7	FALANGE DISTAL DEDO MENIQUE	1
8	FALANGE DISTAL DEDO INDICE Y ANULAR	2
9	FALANGE MEDIA DEDO INDICE Y ANULAR	2
10	FALANGE PROXIMAL 1 DEDO INDICE Y ANULAR	2
11	FALANGE DEDO METACARPIANO 1 INDICE Y ANULAR	2
12	FALANGE PROXIMAL 2 DEDO INDICE Y ANULAR	2
13	FALANGE METACARPIANO 2 DEDO INDICE Y ANULAR	2
14	PALMA DE LA MANO PEQUENA	1
15	PALMA DE LA MANO	1
16	FALANGE METACARPIANO 2 DEDO MEDIO	1
17	FALANGE METACARPIANO 1 DEDO MEDIO	1
18	FALANGE PROXIMAL 2 DEDO MEDIO	1
19	FALANGE PROXIMAL 1 DEDO MEDIO	1
20	FALANGE DISTAL DEDO MEDIO	1
21	FALANGE MEDIA DEDO MEDIO	1
22	FALANGE DISTAL DEDO PULGAR	1
23	FALANGE MEDIA DEDO PULGAR	1
24	FALANGE PROXIMAL 2 DEDO PULGAR	1
25	FALANGE METACARPIANO 1 DEDO PULGAR	1
26	FALANGE PROXIMAL 1 DEDO PULGAR	1
27	FALANGE METACARPIANO 2 DEDO PULGAR	1
28	PASADOR DE LA MANO	1
29	PASADOR DEL PULGAR	1
30	BASE DE LA MANO	1
31	CUBIERTA DE LA BASE	1
32	PASADOR DE LA CUBIERTA	1
33	BRAZALETE 2	1
34	BRAZALETE 1	1
35	BRAZALETE 3	1
37	MIG90servo_gear	2
38	PIN 3	1
39	CUERPO DEL SERVO MG90S	1



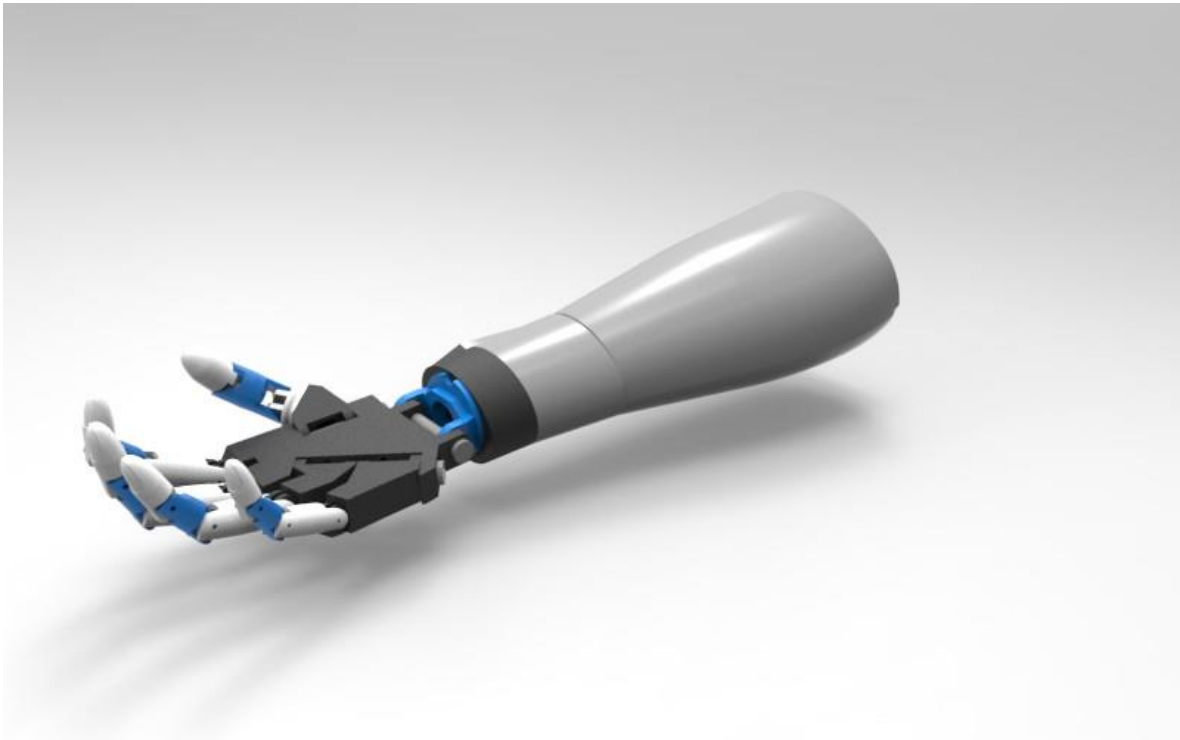
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
DIBUJADO	08/01/17	LAURA MARCELA PRETO ZUETA	
CONFORMADO	15/01/17	LAURA MARCELA PRETO ZUETA	
ESCALA	ENSAMBLE DE MANO, LISTADO DE PIEZAS		PLANO N° 47
2:1	TRABAJO DE GRADO DE TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA		



*Imagen 45: Foto de la Mano Robótica.*



*Imagen 46: Foto de Prótesis Robótica*



*Imagen 47: Mano Robótica*

## 7.2 ALGORITMOS

Código de Arduino

```
#include <eHealth.h>
  Serial.begin(115200);
}

void loop() {
  int EMG = eHealth.getEMG();
  Serial.print(EMG);
  Serial.println("");
  delay(20);
}
```

*Imagen 48: Código del programa para adquirir la señal desde Arduino*

Código creado en Matlab, esta de forma parcial.

```
function arduinogui_OpeningFcn (hObject, eventdata, handles, varargin)
global y x cont
x=0:0.1:50;
y = sin(x);
cont=1;
handles.plot = plot (handles.axes1, x,y);
handles.timer = timer ('ExecutionMode', 'fixedRate', 'Period', 0.2,
'TimerFcn', {@graficar, handles});
handles.ser = serial ('COM9', 'BaudRate', 115200);
handles.ser.BytesAvailableFcnMode = 'terminator';
handles.ser.BytesAvailableFcn = @llamar;
guidata (hObject, handles);
handles.output = hObject;
guidata (hObject, handles);
function varargout = arduinogui_OutputFcn (hObject, eventdata, handles)
varargout {1} = handles.output;
function btadquirir_Callback (hObject, eventdata, handles)
fopen(handles.ser);
if strcmp (get (handles.timer, 'Running'), 'off')
Stuart (handles.timer);
end
guidata (hObject, handles);
function btstop_Callback (hObject, eventdata, handles)
if strcmp (get (handles.timer, 'Running'), 'on')
stop (handles.timer);
end
fclose(handles.ser);
guidata (hObject, handles);
function figure1_CreateFcn (hObject, eventdata, handles)
function graficar (hObject, eventdata, handles)
global y
global v
set (handles.text1, 'string', v);
set (handles.plot, 'ydata', y);
function llamar (hObject, eventdata, handles)

global y cont
global v

cont=1;
end

v = str2double(fscanf(hObject));
y(cont)=v;
cont=cont+1;
uisave({'y'}, 'var1');
```

Código de Arduino por el cual se activa o se desactiva el actuador, dependiendo del valor que tenga la variable.

```
#include <Servo.h>
Servo Servoemg;
int val;
EMG=10;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Servoemg.attach(9);
  pinMode(EMG, INPUT);
}

void loop() {

  float val = EMG * (5.0 / 1023.0);
  Serial.print(val);
  Serial.println("");
  if( val<=1.4)
  {
    Servoemg.write(0); //Mueve el Servo según la lectura análoga
    delay(15);
  }
  if (val>= 1 & val<=1.5)
  {
    Servoemg.write(90); //Mueve el Servo según la lectura análoga
    delay(15);
  }
  if (val>=1.6)
  {Servoemg.write(-90); //Mueve el Servo según la lectura análoga

    delay(15);
  }
}
```

Imagen 49: Código del programa donde se activa el servo dependiendo del valor del voltaje que reciba de la señal

El siguiente código se le dio algunas modificaciones para mejor rendimiento en adquirir la señal y producir el movimiento en los servomotores con una velocidad controlada tanto de avance como de retroceso.

```
#include <Servo.h>
Servo Servoeng;
int val;
int EMG=10;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Servoeng.attach(9);
  pinMode(EMG, INPUT);
}

void loop() {

  float val = EMG * (5.0 / 1023.0);
  Serial.print(val);
  Serial.println("");
  if( val<=1.4)
  {
    Servoeng.write(0); //Mueve el Servo según la lectura análoga
    delay(15);
  }
  if (val>= 1 & val<=1.5)
  {

    { for ( int pos=0; pos<90; pos +=2)
      Servoeng.write(pos); //Mueve el Servo según la lectura análoga
      delay(500);
    }

  }
  if (val>=1.6)
  { for ( int pos=0; pos<-90; pos +=2)
    Servoeng.write(pos); //Mueve el Servo según la lectura análoga
    delay(500);
  }
```

Imagen 50: Código que interactúa con el servo modificado

Se realizó el enlace de Arduino con Matlab para el control del actuador por medio del siguiente algoritmo, logrando por medio de variables booleanas tomar decisiones para que el actuador avance o retroceda.

```
#include <eHealth.h>
Servo Servoemg;
boolean flag=false; //bandera para activar el servo
String str; //dato de matlab
void setup() {
  // inicializacion:
  Serial.begin(9600);
  Servoemg.attach(9); //cambiar esto con el servo
  delay(2000);
}
void loop() {
  if (str=="s")
    flag=true;
  if (str=="n")
    flag=false;
  if (flag==true){
    { for ( int pos=0; pos<90; pos +=2)
      Servoemg.write(pos); //Mueve el Servo según la lectura análoga
      delay(500);
    }
  }
  else
  {
    { for ( int pos=0; pos<-90; pos +=2)
      Servoemg.write(pos);
      delay(500);
    }

    }
    delay(10);
  }
  void serialEvent() {
    str = Serial.readStringUntil('\n')
  }
```

*Imagen 51: Comunicación del servomotor, Arduino y Matlab.*